

# **Kommunikationsdatenbasierte, dezentrale Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen**

Von der  
Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
**Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)**  
genehmigte

## **Dissertation**

von  
Christian Priemer  
geboren am 27.09.1977  
aus Hannover

Eingereicht am	01. April 2010
Disputation am	05. August 2010

Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich
	Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch

2010



„All models are wrong. But some are useful.”

- George E.P. Box -



## **Danksagung**

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Leibniz Universität Hannover sowie in der Folge des Institutswechsels am Institut für Verkehr und Stadtbauwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Professor Bernhard Friedrich für sein Vertrauen in meine Fähigkeiten, den mir gewährten Freiheiten, der Möglichkeit zur Promotion und seinen wertvollen fachlichen Anregungen. Ein herzlicher Dank gilt auch Herrn Professor Fritz Busch von der Technischen Universität München für die Übernahme des Koreferats.

Bedanken möchte ich mich zudem bei meinen ehemaligen Mitarbeitern des ivh, die mich sowohl fachlich als auch persönlich in meinem Werdegang positiv beeinflussten. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle meinen alten Weggefährten Jannis Rohde und meinen Mentor Dr. Stephan Hoffmann.

Diese Dissertationsschrift wäre ohne das Vertrauen und die Unterstützung meiner Familie, insbesondere meiner zukünftigen Frau Isabel Obendorf, nicht möglich gewesen – vielen Dank!

Christian Priemer

## Kurzfassung

Die Zunahme der Verkehrsnachfrage im motorisierten Individualverkehr in urbanen Ballungsräumen in Verbindung mit restriktiven Flächenressourcen führt zu vielfältigen Verkehrsproblemen, die sich in verlängerten Reisezeiten, Anzahl an Halten und erhöhten Emissionen widerspiegeln. Die Qualität des Verkehrsflusses innerhalb städtischer Netze wird wesentlich von der Güte der Lichtsignalsteuerungen beeinflusst. Eine Möglichkeit, den negativen Auswirkungen entgegenzuwirken, besteht daher in der netzweiten Optimierung von signalisierten Knotenpunkten. Vor diesem Hintergrund werden weltweit zunehmend modellbasierte Netzsteuerungsverfahren eingesetzt. Die genaue Ermittlung bzw. Abschätzung der Verkehrslage in den einzelnen Zufahrten ist dabei Grundvoraussetzung für jedes Steuerungsverfahren.

Technische Fortschritte in den Bereichen der drahtlosen Kommunikation und GPS-Lokalisierung ermöglichen neue Möglichkeiten für die Detektion von Fahrzeugen innerhalb signalisierter Zufahrten. In Zukunft wird, basierend auf dem IEEE Standard 802.11p, eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander und mit Infrastrukturelementen möglich sein. Damit wird ein neues Datenpotential geschaffen, welches im Rahmen von Lichtsignalsteuerungen genutzt werden kann, um den Verkehrsfluss innerhalb städtischer Straßennetze zu verbessern. Wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist die frühzeitige und kontinuierliche Detektion von kommunikationsfähigen Fahrzeugen in den Zu- und Abflüssen von Lichtsignalanlagen. Kontinuierlich übermittelte Positions- und Geschwindigkeitsdaten sowie ggf. Routeninformationen vom Fahrzeug zu einem Access Point an der Lichtsignalanlage (V2I-Daten) stellen einen signifikanten Informationsgewinn dar, der zur Optimierung von Steuerungsverfahren genutzt werden sollte.

Im Rahmen der vorgelegten Dissertationsschrift wurde ein azyklisches, dezentrales Steuerungsverfahren entwickelt, welches das neue Datenpotential an V2I-Daten nutzt und die Freigabezeitdauern entsprechend der augenblicklichen Verkehrsnachfrage in den einzelnen Zufahrten optimiert. Es erfolgt kein Austausch von Informationen zwischen benachbarten Knotenpunkten oder mit einer übergeordneten taktischen Ebene. Trotz des dezentralen Ansatzes können nachweislich Koordinierungs- und Priorisierungsstrategien mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren für Fahrbeziehungen oder einzelne Fahrzeuge umgesetzt werden. Die Steuerung jedes Knotenpunkts erfolgt phasenbasiert. Die Zuordnung von Signalgruppen zu Phasen, die Bestimmung von Zwischenzeiten sowie die einzelnen Phasenübergänge werden im Vorhinein planerisch festgelegt. Die Anzahl der möglichen Phasen und Varianten an Phasenübergängen ist nicht beschränkt. Zu jedem Optimierungsintervall von  $\Delta t = 5\text{s}$  werden anhand von V2I-Daten die ent-

stehenden Warteschlangen für jede Phasenkombination für einen Optimierungshorizont von  $4\Delta t=20s$  prognostiziert. Entsprechend der formulierten Zielfunktion wird diejenige Phasenfolge ausgewählt, welche die Gesamtrückstaulängen am Knotenpunkt minimiert.

Wesentlichen Einfluss auf die Qualität der neuen Lichtsignalsteuerung hat der Anteil an kommunikationsfähigen Fahrzeugen im betrachteten Netz, die so genannte Penetrationsrate. Daher wurde eine Methode entwickelt und in das Verfahren integriert, die anhand von wenigen kommunikationsfähigen Fahrzeugen in der Warteschlange eine zuverlässige Schätzung der Rückstaulängen anhand von V2I-Daten sicherstellt. Im Zuge geringer Penetrationsraten sinkt zudem die Wahrscheinlichkeit, dass ein kommunikationsfähiges Fahrzeug innerhalb der Warteschlange eintrifft, ehe die entsprechende Zufahrt mit nicht-kommunikationsfähigen Fahrzeugen überstaut ist. In der Folge entstehen Rückstaus in benachbarte Knotenpunkte, die zu einem netzweiten Verkehrszusammenbruch in Folge mangelnder Detektion führen können. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen des entwickelten Steuerungsverfahrens zusätzlich Daten von haltliniennahen Anforderungsschleifen in den Knotenpunktszufahrten verwendet. Hierdurch können zudem maximale Wartezeiten in den Nebenrichtungen überwacht und sichergestellt werden.

Das entwickelte Steuerungsverfahren wurde im Rahmen umfangreicher Simulationsuntersuchungen im Labor getestet. Als Wirkungsmodell dient der mikroskopische Verkehrsflusssimulator AIMSUN NG (TSS, 2007). Die Modellierung der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur sowie die Implementierung des neuen Steuerungsverfahrens (inkl. Methode zur Rückstauschätzung) erfolgt über die definierte, offene Schnittstelle AIMSUN API-Modul in der Programmiersprache C++. Als Referenzsteuerung dient eine mit TRANSYT-7F (HALE, 2005) optimierte Festzeitsteuerung.

## Abstract

The control of the increasing traffic volumes in cities worldwide is one of the main challenges of traffic engineering even today and especially in the future. Only intelligent control strategies can reduce the negative impacts of congested urban networks like increasing travel times, increasing number of stops and therefore high pollutant emissions. Due to their role as bottlenecks within urban road networks, optimizing the traffic flow at signalized intersections is one of the key factors for reducing the mentioned impacts. Vehicle actuated control in urban networks requires information of the current and future traffic state as accurate as possible. Technical advances in wireless communication and GPS-location offer new meaningful options for vehicle detection at signalized intersections like the early and continuous detection of approaching vehicles within the communication range. Based on this, arrival patterns can be forecasted reliably for each approach and traffic signal control can be optimized even before vehicles arrive at the stop line. The ongoing development and standardization of the technical framework for sending and receiving information between vehicles and the infrastructure like traffic signals (V2I-communication) are considered.

The presented traffic control method takes advantage of the benefits of V2I-communication data. Major aim of the new control method is to react on the current traffic situation and to adjust the green time durations and phase sequence very quickly. Therefore the strategy is designed as decentralized and phase-based like traditional traffic signal control methods but operates without common parameters like cycle times, offsets or other fixed timings. Each discrete time interval of  $\Delta t=5s$  the control algorithm forecasts the future queue length for the next 20s by analyzing the received vehicles position and speed data and determines the optimal green time duration and phase sequence in order to reduce the total queue length at each intersection. The presented strategy is designed for networks and considers real planning constraints like inter-green times for pedestrians. Despite of the decentralized concept, the new approach provides methods for priority strategies and to coordinate neighbouring intersections.

The quality of the new traffic signal control mainly depends on the number of vehicles equipped with communication devices with respect to the total number of vehicles, the so called penetration rate. Therefore, various penetration rates are modelled to obtain the impact factor exactly. To reduce quality loss due to low or mid penetration rates a method for queue length estimation is integrated in the control algorithm. Due to decreasing penetration rates the probability drops



that vehicles with communication devices reach the communication range before the approach is congested. Hence, additional data of loop detectors (located in front of the stop lines) are processed additionally to detect and to serve vehicles without communication devices especially in minor directions. In order to analyze the performance of the new signal control, the method is embedded in the simulation environment of the microscopic traffic simulator AIMSUN NG (TSS, 2007). For reference TRANSYT-7F (HALE, 2005) is used.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Motivation.....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2 Stand der Technik der Lichtsignalsteuerung.....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundbegriffe der Lichtsignalsteuerung .....	5
2.2 Steuerungsverfahren.....	7
2.2.1 Festzeitsteuerung.....	7
2.2.2 Verkehrsabhängige Steuerungen .....	7
2.3 Beispiele für Netzsteuerungsverfahren .....	10
2.4 Methoden zur Erfassung und Schätzung von Rückstaulängen.....	14
<b>3 Fahrzeugkommunikation in städtischen Straßennetzen .....</b>	<b>19</b>
3.1 Funktionsweise.....	19
3.2 Einsatzfelder von Fahrzeugkommunikation in Städten .....	21
3.3 Konzepte für Lichtsignalsteuerungen unter Nutzung von Kommunikationsdaten .....	26
3.4 Nutzen von Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikationsdaten für Lichtsignalsteuerungen	28
3.5 Erforderliche Penetrationsraten für ausgewählte Applikationen.....	29
3.6 Positionierungsverfahren.....	31
<b>4 Optimierungsverfahren .....</b>	<b>33</b>
4.1 Allgemeines.....	33
4.2 Heuristiken .....	35
4.2.1 Hill-Climbing Algorithmus .....	35

4.2.2	Genetischer Algorithmus.....	36
4.3	Exakte mathematische Verfahren.....	37
4.3.1	Vollständige Enumeration.....	37
4.3.2	Dynamische Programmierung.....	37
4.4	Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen basierend auf den Methoden der Vollständigen Enumeration und Dynamischen Programmierung.....	38
4.5	Wahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens.....	42
<b>5</b>	<b>Konzept des dezentralen Steuerungsverfahrens.....</b>	<b>45</b>
5.1	Zielsetzung.....	45
5.2	Formulierung des Verfahrens.....	45
5.3	Optimierungsverfahren und Zielfunktion.....	46
5.4	Systemarchitektur.....	48
5.5	Bausteine des Steuerungsverfahrens.....	51
5.5.1	Lokales Verkehrslagemodell.....	51
5.5.2	Lokales Wirkungsmodell.....	64
5.5.3	Lokales Steuerungsmodell.....	72
<b>6</b>	<b>Testumgebung.....</b>	<b>75</b>
6.1	Simulationsmodell.....	75
6.2	Simulationsumfang.....	76
6.2.1	Testnetz.....	76
6.2.2	Verkehrsnachfrage.....	78
6.2.3	Modellierung des Verkehrsflusses innerhalb signalisierter Knotenpunkte.....	78
6.2.4	Lichtsignalsteuerungen.....	80
6.2.5	Modellierung der Fahrzeug-Infrastruktur Kommunikation.....	83
6.2.6	Modellierte Szenarios.....	84
<b>7</b>	<b>Simulationsergebnisse.....</b>	<b>87</b>
7.1	Bewertungsmethodik.....	87
7.2	Nachfrageszenario 1: Konstante Verkehrsnachfrage.....	87
7.2.1	Netzweite Betrachtung.....	88
7.2.2	Kantenfeine Betrachtung.....	94
7.3	Nachfrageszenario 2: Dynamische Schwankungen in der Verkehrsnachfrage.....	100
7.3.1	Netzweite Betrachtung.....	101
7.3.2	Kantenfeine Betrachtung.....	105
7.4	Fazit.....	109

---

<b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>111</b>
8.1 Zusammenfassung .....	111
8.2 Ausblick .....	115
<b>Literatur .....</b>	<b>117</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>127</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>129</b>
<b>Verzeichnis des Anhangs .....</b>	<b>131</b>



# 1 Motivation

## 1.1 Hintergrund

Die Zunahme der Verkehrsnachfrage im motorisierten Individualverkehr in den Verdichtungsräumen von Metropolregionen in Kombination mit Restriktionen in den Flächenressourcen führt weltweit zu vielfältigen verkehrlichen Problemfeldern. Insbesondere in der morgendlichen und abendlichen Hauptverkehrszeit treten bereits heute Überlastungen der vorhandenen städtischen Infrastruktur auf. Verlängerte Reisezeiten und eine damit verbundene Erhöhung von Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs spiegeln dies wider.

Überlastungen bzw. Störungen in Straßennetzen sind in der Existenz von Engstellen begründet (DAGANZO, CASSIDY, BERTINI, 1999). Innerhalb städtischer Straßennetze entstehen Rückstaus und lange Wartezeiten nicht nur aufgrund einer zu hohen Verkehrsnachfrage, sondern insbesondere auch durch suboptimale, teilweise veraltete Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen (PAPAGEORGIOU, DIAKAKI, DINOPOULOU et al., 2003). Die Qualität des Verkehrsablaufs wird daher wesentlich von der Güte der Lichtsignalsteuerungen beeinflusst.

Eine Möglichkeit, den negativen Auswirkungen entgegen zu wirken, besteht in der netzweiten Optimierung von Lichtsignalsteuerungen. Zunehmend werden daher weltweit adaptive Netzsteuerungsverfahren eingesetzt. In der Regel handelt es sich dabei um modellbasierte online Verfahren, die auf einer zentralen, taktischen Ebene Rahmensignalpläne generieren und diese an die einzelnen lokalen Steuerungsgeräte im Netz periodisch übermitteln. Die genaue Ermittlung der aktuellen Verkehrszustände als Eingangsdaten für die verwendeten Verkehrsmodelle ist dabei eine zentrale Aufgabe (FRIEDRICH, 1999). Eingangsdaten der verwendeten Verkehrsmodelle sind in der Regel lokal erhobene Detektordaten.

In Zukunft wird, basierend auf dem IEEE Standard 802.11p, eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander und zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturelementen möglich sein. Damit wird ein neues Datenpotential geschaffen, welches im Rahmen verschiedener Applikationen genutzt werden kann, um die Verkehrslenkung zu verbessern sowie die Verkehrssicherheit und den Fahrkomfort zu erhöhen. Insbesondere in urbanen Straßennetzen kann die neue Technologie einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, den Verkehrsfluss innerhalb signalisierter Knotenpunkte zu optimieren und damit die negativen Folgen für Mensch und Umwelt zu reduzieren.

Wesentlicher Vorteil der neuen Technologie ist die frühzeitige und kontinuierliche Detektion von kommunikationsfähigen Fahrzeugen in den Zu- und Abflüssen von Lichtsignalanlagen. Kontinuierlich übermittelte Positions- und Geschwindigkeitsdaten sowie ggf. Routeninformationen vom Fahrzeug zu einem Access Point an der Lichtsignalanlage stellen einen signifikanten Informationsgewinn dar, der zur Optimierung von Steuerungsverfahren genutzt werden sollte.

## 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Das Ziel der vorgelegten Arbeit liegt in der Entwicklung eines innovativen Steuerungsverfahrens für Lichtsignalanlagen, welches das zukünftig verfügbare Datenpotential an fahrzeuggenerierten Kommunikationsdaten optimal nutzt, um den städtischen Verkehrsablauf deutlich zu verbessern. Das zu entwickelnde Verfahren soll so gestaltet werden, dass es sich in kürzester Zeit dynamisch und automatisch verschiedenen Nachfrageszenarios anpassen kann. Aufgrund der angestrebten kurzen Reaktionszeit des Verfahrens, wird im Rahmen dieser Arbeit ein azyklischer und dezentraler Ansatz gewählt. Jede Knotenpunktsteuerung im Netz wird unabhängig von weiteren Knotenpunkten lokal optimiert. Es findet kein Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Anlagen oder mit einer zentralen Ebene statt. In kurzen Zeitfenstern soll eine Anpassung der Freigabezeiten einzelner Phasen an die augenblickliche Verkehrsnachfrage erfolgen. Trotz des hohen Dynamisierungsgrads wird sichergestellt, dass planerische Vorgaben wie Mindestfreigabezeiten und Zwischenzeiten für alle Verkehrsarten nicht verletzt werden. Weiterhin werden, trotz des dezentralen Ansatzes, eine Koordinierung von benachbarten Knotenpunkten im Netz sowie Maßnahmen zur Priorisierung von Sondereinsatzfahrzeugen oder Fahrzeugen des öffentlichen Nahverkehrs realisierbar sein.

Wesentlichen Einfluss auf die Qualität der neuen Lichtsignalsteuerung hat der Anteil an kommunikationsfähigen Fahrzeugen im betrachteten Netz, die so genannte Penetrationsrate. Eine flächendeckende Markteinführung der neuen Technologie in Fahrzeuge ist zum derzeitigen Stand nicht absehbar. Entsprechend ist auch eine hohe Penetrationsrate an kommunikationsfähigen Fahrzeugen nicht prognostizierbar. Ein primäres Ziel der Arbeit liegt daher in der Analyse des negativen Einflusses von geringen und mittleren Ausstattungsraten auf die Güte des entwickelten Steuerungsverfahrens. Es sollen zudem Methoden entwickelt werden, die auch bei geringen und mittleren Ausstattungsraten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen eine zuverlässige Verkehrslageschätzung sicherstellen und damit den zu erwartenden Qualitätsverlust reduzieren.

Die Arbeit hat den Anspruch, ein Steuerungsverfahren zu entwickeln, welches in der Zukunft, nach einer gewissen Marktdurchdringung der neuen Technologie, eine deutliche Verbesserung des Verkehrsflusses innerhalb städtischer Netze erzielen kann. Die Arbeit verfolgt ausdrücklich nicht das Ziel zum Zeitpunkt der Markteinführung bzw. bei sehr geringen Ausstattungsraten von weniger als 10% einsatzfähig zu sein.

Die Entwicklung und Erprobung des neuen Steuerungsverfahrens erfolgt unter realen Bedingungen in einer Simulationsumgebung. Als reales Testnetz wird ein vermaschtes Stadtteilnetz der Landeshauptstadt Hannover gewählt, welches aus neun signalisierten und sechs vorfahrts-geregelten Knotenpunkten besteht. Als Referenz zur Bewertung der neuen dezentralen Steuerung unter Berücksichtigung verschiedener Verkehrsnachfrage- und Penetrationsratenszenarios wurde das offline-basierte Netzsteuerungsverfahren TRANSYT-7F (HALE, 2005, ROBERT-



SON, 1969) vergleichend betrachtet. Als Wirkungsmodell wird das mikroskopische Simulationstool AIMSUN NG (TSS, 2007) verwendet.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Wirkungsweise der neuen Steuerung auf den innerstädtischen Verkehrsfluss. Das verwendete Simulationsmodell hat daher den Anspruch, ein realitätsnahes Fahrzeugverhalten abzubilden. Die zu modellierende Kommunikation zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage erfolgt hingegen mit vereinfachten Annahmen. Entstehende Fehler durch z.B. Rauschen, Latenzzeiten oder Positionsungenauigkeiten werden nicht direkt abgebildet, sondern über variable Penetrationsraten berücksichtigt. Fahrzeuge, die in der Realität aufgrund von Kommunikationsfehlern nicht detektiert werden würden, können im Rahmen dieser Arbeit als nicht-kommunikationsfähige Fahrzeuge interpretiert werden.

Aufgrund der äußerst diffizil zu modellierenden Fahrerreaktion auf Fahrempfehlungen wird ausschließlich die Fahrzeug-Infrastruktur Kommunikation betrachtet. Eine Modellierung der technisch realisierbaren Übermittlung von Steuerungsinformationen bzw. Fahrempfehlungen in das Fahrzeug, ein aktives Eingreifen in die Fahrzeugführung oder die Abbildung autonomer Fahrzeuge sind nicht Gegenstand der vorgelegten Arbeit.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die vorgelegte Dissertationsschrift gliedert sich in insgesamt acht Kapitel auf.

In Kapitel 2 wird der Stand der Technik von Lichtsignalsteuerungen aufgezeigt und es werden die wichtigsten Grundbegriffe eingeführt. Es werden die heute in der Praxis verwendeten Strategien: Festzeitsteuerung, messwertbasierte und modellbasierte Steuerungsverfahren erläutert. Etablierte Verfahren zur Netzsteuerung sowie Methoden zur Verkehrslageschätzung anhand von stationären Detektordaten vervollständigen dieses Kapitel.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem neuen Datenpotential an fahrzeuggenerierten Kommunikationsdaten. Es werden die Funktionsweise der Technologie, mögliche Einsatzfelder im innerstädtischen Bereich und erste Konzepte zur Nutzung von Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikationsdaten im Rahmen von Lichtsignalsteuerungen vorgestellt. Wesentlich beeinflusst werden die präsentierten Applikationen von dem Ausstattungsgrad an kommunikationsfähigen Fahrzeugen. Eine Betrachtung der erforderlichen Penetrationsraten für ausgewählte Applikationen sowie Erkenntnisse zur erwartenden zeitlichen Dauer von Technologieeinführungen im Automobilsektor beschließen Kapitel 3.

Im Mittelpunkt von Kapitel 4 stehen Optimierungsverfahren. Hier werden heuristische und exakte Verfahren unterschieden. Stellvertretend für Heuristiken werden die, innerhalb von modellbasierten Netzsteuerungsverfahren häufig verwendeten, Näherungsverfahren: Hill-Climbing Algorithmus und Genetischer Algorithmus dargestellt. Stellvertretend für exakt mathematische Optimierungsverfahren werden die Methoden der Dynamischen Programmierung und der Vollständigen Enumeration betrachtet. Nach einer Diskussion der möglichen Optimierungsmethoden wird das Verfahren der Vollständigen Enumeration für die Optimierung der Freigabezeiten innerhalb des entwickelten Steuerungsverfahrens gewählt und abschließend erläutert.

Das Konzept des entwickelten Steuerungsverfahrens und dessen Bausteine stehen im Fokus von Kapitel 5. Hier erfolgt die Formulierung der verwendeten Zielfunktion sowie die Darstellung der Systemarchitektur, die aus den drei Hauptkomponenten: Onboard-Units in Fahrzeugen, Road-Side Units an den Lichtsignalanlagen sowie den eigentlichen Steuergeräten besteht. Für

Szenarios mit geringen bis mittleren Penetrationsraten werden Daten haltliniennaher Schleifendetektoren als weitere Detektionsquelle ergänzend verwendet. Neben dem eigentlichen Steuerungsverfahren wird in diesem Kapitel eine Methode zur Rückstauschätzung präsentiert. Anhand von wenigen kommunikationsfähigen Fahrzeugen in der Warteschlange und Informationen aus dem Steuergerät kann die präsentierte Methode Rückstaulängen bis zum Zeitpunkt des Phasenwechsels prognostizieren. Die entwickelte Methode wurde in das Steuerungsverfahren integriert, um insbesondere bei geringen Ausstattungsraten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen einen Qualitätsabfall der Steuerung in Folge einer eingeschränkten Verkehrslageerkennung zu reduzieren.

Kapitel 6 beinhaltet die Darstellung der Simulationsumgebung. Als Wirkungsmodell wird der mikroskopische Verkehrsflusssimulator AIMSUN NG (TSS, 2007) verwendet. Die Modellierung der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur sowie die Implementierung des neuen Steuerungsverfahrens erfolgt über die definierte, offene Schnittstelle AIMSUN API-Modul in der Programmiersprache C++. Als Testnetz wird das reale Teilnetz Hannover-Südstadt verwendet. Das neue Steuerungsverfahren wird in verschiedenen Ausbaustufen unter Berücksichtigung realer Planungsdaten der Landeshauptstadt Hannover (z.B. Mindestfreigabezeiten, Zwischenzeiten) in der morgendlichen Spitzenverkehrszeit getestet. Als Referenzsteuerung dient eine mit Transyt-7F (HALE, 2005, ROBERTSON, 1969) optimierte Festzeitsteuerung.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen präsentiert. Das neue Steuerungsverfahren wird im Rahmen verschiedener Nachfrageszenarios und Ausstattungsgraden an kommunikationsfähigen Fahrzeugen der Referenzsteuerung Transyt-7F gegenübergestellt und bewertet. Neben der Beurteilung der verkehrlichen Wirkung für das Gesamtnetz werden einzelne Zufahrten und koordinierte Streckenzüge betrachtet.

Kapitel 8 fasst die vorgelegte Dissertationsschrift zusammen und gibt einen Ausblick über weitere mögliche Ausbaustufen des Verfahrens.

## **2 Stand der Technik der Lichtsignalsteuerung**

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Entwicklung eines zukünftigen Steuerungskonzepts für Lichtsignalanlagen. Im Folgenden werden daher zunächst die Ziele und Grundbegriffe der Lichtsignalsteuerung sowie der Stand der Technik von Steuerungsverfahren erläutert.

Lichtsignalanlagen nehmen eine Schlüsselrolle im (städtischen) Verkehrsmanagement ein. So beeinflusst die Güte des verwendeten Steuerungsverfahrens maßgeblich die Qualität des Verkehrsablaufs und der Umwelt.

Grundlegende Ziele der Einrichtung von Lichtsignalanlagen sind (FGSV, 2007):

- Verbesserung der Verkehrssicherheit und
- Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs.

Unterschieden werden Lichtsignalsteuerungen zum einen hinsichtlich ihres räumlichen Einsatzbereiches nach:

- Knotenpunktsteuerung,
- Steuerung von Linienzügen,
- Netzsteuerungen (zentral/dezentral) und

zum anderen hinsichtlich der verwendeten Strategie nach:

- Festzeitsteuerungen,
- verkehrsabhängigen Steuerungen (regelbasiert/ modellbasiert) und
- der Art der Datenerfassung (online/ offline).

### **2.1 Grundbegriffe der Lichtsignalsteuerung**

Die wichtigsten Begriffe zum Verständnis von Lichtsignalsteuerungen werden in logischer Reihenfolge im Folgenden kurz erläutert.

Verkehrsstrom:	Zusammenfassung aller Fahrzeuge innerhalb einer Verkehrsbeziehung bzw. aller Fahrzeuge, die einen (Misch-)Fahrstreifen gemeinsam benutzen.
----------------	--

Signalgruppen:	Eine Signalgruppe besteht aus einem oder mehreren Signalgebern, die zu jeder Zeit das gleiche Signalbild für bestimmte Verkehrsströme anzeigen.
Übergangszeit:	Zeitintervall zwischen Sperrzeitende und Freigabezeitbeginn (Signalbild: ROT/GELB vor GRÜN) bzw. vice versa (Signalfolge: GELB vor ROT). Die Dauer für das Signalbild GELB vor ROT richtet sich nach der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (z.B. 3s bei 50km/h), während das Signalbild ROT/GELB vor GRÜN mindestens 1s und maximal 2s geschaltet wird.
Zwischenzeiten:	Zeitdauer zwischen dem Ende der Freigabezeit und dem Beginn der Freigabezeit für zwei dieselbe Konfliktfläche nacheinander benutzende Verkehrsströme (FGSV, 2000). Die Zwischenzeit bemisst sich nach der Überfahr-, Räum- und Einfahrzeit getrennt nach den einzelnen Verkehrsarten. Zwischenzeiten sind für alle Kombinationen an nichtverträglichen Strömen zu bemessen und in einer Matrix darzustellen.
Signalprogramm:	Innerhalb eines Signalprogramms werden die Signalzeiten für jede Signalgruppe zeitlich exakt festgelegt.
Rahmensignalplan:	Ein Rahmensignalplan legt im Gegensatz zu einem Signalprogramm die Signalzeiten nicht exakt fest, sondern definiert minimale und maximale Freigabezeitdauern für Signalgruppen. Innerhalb dieser definierten Rahmen können Freigabezeitverlängerungen für bestimmte Ströme vorgehalten werden.
Phase:	Zusammenfassung aller Signalgeber, die für ein bestimmtes Zeitintervall gleichzeitig ein Freigabesignal anzeigen. Als Phasenfolge wird die zeitliche Reihung der verschiedenen Phasen innerhalb eines Signalprogramms bezeichnet.
Phasenübergang:	Zeitdauer zwischen dem Freigabezeitende der aktuellen Phase und dem Freigabezeitbeginn der folgenden Phase unter Berücksichtigung der Zwischenzeiten.
Umlaufzeit:	Zeitdauer eines vollständigen Ablaufs eines Signalprogramms.
Mindestfreigabezeit:	Kleinste, unabhängig von der Verkehrsstärke zu gebende Freigabezeit (FGSV, 2000).
Sättigungsverkehrsstärke:	Maximal mögliche Verkehrsstärke eines Fahrstreifens während einer Freigabezeit (FGSV, 2000).
Versatzzeiten:	Bezeichnung für den zeitlichen Versatz des Freigabezeitbeginns an aufeinander folgende Knotenpunkte im Zuge von Koordinierungsmaßnahmen.

## 2.2 Steuerungsverfahren

### 2.2.1 Festzeitsteuerung

Der einfachste und älteste Weg, einen Knotenpunkt lichtsignaltechnisch zu regeln, ist die Festzeitsteuerung. Festzeitsteuerungen agieren unabhängig von der aktuellen Verkehrslage. Auf Basis von historischen Messungen, die für einen definierten Zeitraum als allgemeingültig angenommen werden, erfolgt die Festlegung der Umlaufzeiten, Phasen, Phasenfolge und Freigabezeitanteilen für ein Signalprogramm. Jeder Strom erhält damit eine feste Freigabezeit innerhalb eines Umlaufs.

Für die Berücksichtigung von tageszeitlichen Veränderungen in der Verkehrsnachfrage werden verschiedene Festzeitprogramme - so genannte Tageszeitprogramme - a priori konzipiert, die in Abhängigkeit der Tageszeit geschaltet werden können. In der Regel handelt es sich dabei um Signalpläne für die morgendliche und abendliche Spitzenverkehrszeit sowie für die Neben-(mittags) und Schwachverkehrszeit (nachts).

Wesentliche Vorteile dieses Steuerungsverfahrens sind die einfache Konzipierung, die Robustheit im Betrieb sowie die geringen Bau- und Betriebskosten. So benötigt diese Steuerung keinerlei Detektorik in den einzelnen Zufahrten. Zudem lassen sich festzeitgesteuerte Knotenpunkte innerhalb von Streckenzügen ohne softwareseitige Unterstützung in der Regel gut koordinieren.

Der wesentliche Nachteil dieser Steuerung liegt in der Unberücksichtigung von natürlichen Schwankungen in der Verkehrsnachfrage. Weicht die aktuelle Verkehrsnachfrage signifikant von der zugrunde liegenden historischen Messung ab, beispielsweise aufgrund von Sonderereignissen, kann die Steuerung nicht reagieren. Zudem stellten BELL und BRETHERTON (1986) fest, dass sich die Verkehrsnachfrage an signalisierten Knotenpunkten durchschnittlich um 3% pro Jahr verändert. Dies würde eine jährliche Aktualisierung der Signalprogramme auf Basis aktueller Knotenstromzählungen bedingen, welche in der Regel nicht stattfindet.

Daher sollten Festzeitsteuerungen nur bei zu erwarteten konstanten Belastungszuständen eingesetzt werden. Zudem sind Priorisierungsstrategien für z.B. Fahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs nicht umsetzbar.

### 2.2.2 Verkehrsabhängige Steuerungen

#### 2.2.2.1 Regelbasierte Steuerungsverfahren

Regelbasierte Steuerungsverfahren folgen einer meist sehr einfachen Ablauflogik, mit der aktuell erhobene Messwerte von Detektoren direkt in Schaltbefehle umgewandelt werden. Eine qualitative Überprüfung der generierten Schaltbefehle hinsichtlich der zu erwartenden verkehrlichen Wirkung findet dabei nicht statt. Aufgrund der internen Datenverarbeitung werden regelbasierte Steuerungsverfahren daher auch als messwertbasierte Verfahren bezeichnet.

Innerhalb der Ablauflogik sind logische (z.B. Zeitlücken, Belegungszeiten) und zeitliche Bedingungen (z.B. minimale und maximale Freigabezeiten) definiert. Auf Basis eines Vergleichs zwischen gemessenen verkehrlichen Kenngrößen und vordefinierten Grenzwerten werden Schaltbefehle generiert (vgl. Abbildung 1). Für die notwendige Erfassung mikroskopischer verkehrlicher Kenngrößen werden Detektoren in den einzelnen Zufahrten verwendet.

Angepasst werden in der Regel Freigabezeitdauern, die durch eine untere (minimale Freigabezeit) und eine obere Grenze (maximale Freigabezeit) im Vorhinein beschränkt werden. Jeder Phase wird dabei ein zeitlicher Puffer zugeschrieben, der in Abhängigkeit der erfassten Zeitlücken, in Form einer Freigabezeitverlängerung, genutzt werden kann. Sind die erfassten Zeitlücken geringer als ein vordefinierter Grenzwert, wird dies als eine sich nähernde Gruppe von Fahrzeugen, ein so genannter Fahrzeugpulk, interpretiert und die aktuelle Freigabezeit bis zum Erreichen der oberen Grenze maximal verlängert. Im anderen Fall wird die aktuelle Freigabezeit beendet und ein anfordernder Strom zum frühest möglichen Zeitpunkt bedient. In Perioden hoher Verkehrsnachfragen in jedem Strom wird der zeitliche Puffer von jeder Phase maximal genutzt. Dieses hat zur Folge, dass sich die verkehrsabhängige, regelbasierte Steuerung einer Festzeitsteuerung annähert (BRETHERTON, RAI, 1982, BRILON, GROßMANN, BLANKE, 1994).

Regelbasierte Steuerungsverfahren werden in der Regel zur Steuerung von einzelnen Knotenpunkten oder Streckenzügen konzipiert. Wesentlicher Vorteil von regelbasierten Steuerungen, im Vergleich zu den nachfolgend beschriebenen modellbasierten Verfahren, ist der geringe Bedarf an Rechnerressourcen und die Realisierung sehr schneller Reaktionszeiten von 1s, die insbesondere im Rahmen von Priorisierungsmaßnahmen wertvoll sind (MERTZ, 2001).

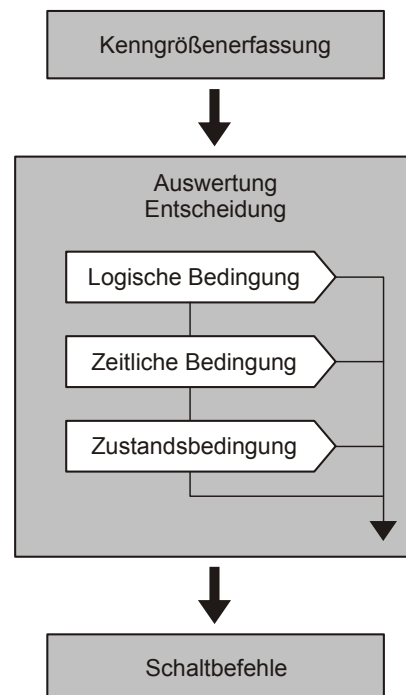


Abbildung 1: Ablauflogik einer regelbasierten Steuerung (FGSV, 2007)

### 2.2.2.2 Modellbasierte Steuerungsverfahren

Im Gegensatz zu regelbasierten Steuerungsverfahren werden im Rahmen modellbasierter Steuerungsverfahren die erhobenen Messwerte nicht unmittelbar zu Schaltbefehlen verarbeitet, sondern fließen zunächst in ein Verkehrsmodell ein.

Abbildung 2 zeigt die Bestandteile einer modellbasierten Steuerung. Die erfassten verkehrlichen Kenngrößen werden innerhalb eines Verkehrsnachfragemodells für die Analyse der aktuellen Verkehrsnachfrage und einer Kurzzeitprognose verwendet. Mit Hilfe dieser Daten wird das Verkehrsflussmodell kontinuierlich aktualisiert, aus dem weitere verkehrliche Kenngrößen (z.B. Rückstaulängen, Wartezeiten) abgeleitet werden können. Innerhalb des Wirkungsmodells erfolgt die Bewertung verschiedener Steuerungsparameter hinsichtlich ihrer verkehrlichen Wirkung anhand einer definierten Zielfunktion. In dieser werden alle zu bewertenden Kenngrößen mit geeigneten Gewichtungsfaktoren zu einem Bewertungs- bzw. Performanceindex zusammengefasst. In Abhängigkeit von der Netzgröße bedingt die Auswahl der optimalen Steuerungsparameter die Verwendung von intelligenten Optimierungsverfahren, die in Kapitel 4 näher betrachtet werden.

Die Verwendung von Verkehrsmodellen ermöglicht die Erstellung eines Verkehrslagebilds für gesamte Netze. Wesentlicher Vorteil ist, dass nicht nur Freigabezeiten an kurzfristige Schwankungen in der Verkehrsnachfrage angepasst, sondern auch vollständige Rahmensignalpläne neu generiert werden können. Die sorgfältige Kalibrierung jedes einzelnen Modellparameters ist dabei Grundvoraussetzung, um systematische Fehler zu vermeiden.

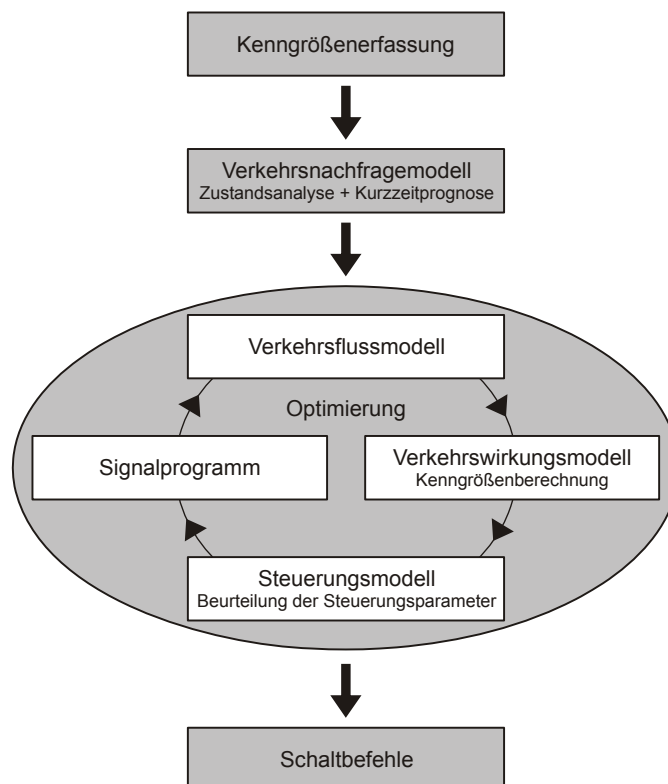


Abbildung 2: Modellbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens (FGSV, 2007)

### 2.3 Beispiele für Netzsteuerungsverfahren

Das bekannteste und weltweit verbreiteste Verfahren zur offline Optimierung von Festzeitsteuerungen innerhalb von Netzwerken ist **TRANSYT** (**Traffic Network Study Tool**). Auf Basis grundlegender Arbeiten von ROBERTSON (1969) wurde dieses Verfahren von HALE (2005) kontinuierlich weiterentwickelt und ist heute vor allem in Großbritannien und Nordamerika weit verbreitet.

Mit Hilfe von TRANSYT können die Parameter: Umlaufzeiten, Versatzzeiten, Phasenfolgen und Freigabezeitanteile optimiert werden. Der Nutzer kann zwischen den in Abschnitt 4.2 detailliert beschriebenen Optimierungsmethoden Hill-Climbing Algorithmus und Genetischen Algorithmus wählen. Innerhalb verschiedener vordefinierter Zielfunktionen können Signalprogramme für Festzeitsteuerungen hinsichtlich ihrer verkehrlichen Wirkung anhand eines Güteindexes bewertet werden. Innerhalb der Zielfunktionen werden dabei die Parameter mittlere Wartezeit, Rückstaulänge, Kraftstoffverbrauch sowie Anzahl an Halten unterschiedlich gewichtet.

Koordinierungen von benachbarten Knotenpunkten in Streckenzügen können mit Hilfe von definierbaren Haupttrouten festgelegt werden. Eingangsgrößen in das Verfahren sind: Verkehrsbelastungen in den Netzzuflüssen, Knotenstrombelastungen sowie Phasen und Phasenübergänge. Grundvoraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist eine einheitliche Umlaufzeit an allen signalisierten Knotenpunkten im Netz.

Basierend auf den Erkenntnissen aus TRANSYT und den Weiterentwicklungen im Bereich der Datenverarbeitung wurde 1973 in Großbritannien das wohl bekannteste zentrale modellbasierte Netzsteuerungsverfahren entwickelt: **SCOOT** (**Split Cycle and Offset Optimisation Technique**) (HUNT, ROBERTSON, BRETHERTON, 1981). Mit diesem Verfahren ist eine online Optimierung der Freigabezeitanteile, Umlauf- und Versatzzeiten in Straßennetzen möglich. Die Festlegung der Phasenanzahl und -folge erfolgt a priori.

Grundlage von SCOOT ist das Verkehrsmodell aus TRANSYT, welches mit Hilfe von aktuellen Detektordaten aus jeder Zufahrt sowie Daten vorangegangener Umläufe aktualisiert wird. Auf Basis der Detektordaten und Annahmen für die Parameter *mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit* und *Pulkauflösung* sowie den aktuellen Signalzuständen werden mesoskopische „cycle flow profiles“ bzw. Verkehrsflussprofile generiert, mit denen die Ankunftszeiten der sich nähernden Fahrzeuge in jeder Zufahrt prognostiziert werden können. Idealerweise befinden sich die Detektoren am Beginn der Zufahrt bzw. am Ausgang des benachbarten Knotenpunkts. Abbildung 3 zeigt die Funktionsweise des bekannten Verkehrsmodells.

Die drei Steuerungsparameter Freigabezeit, Umlaufzeit und Versatzzeit werden separat von einander kontinuierlich optimiert. Innerhalb der Freigabezeitoptimierung wird einige Sekunden vor dem planmäßigen Ende der Freigabezeit anhand der Verkehrsflussprofile entschieden, ob der Phasenwechsel verfrüht, planmäßig oder verspätet durchgeführt werden soll. Die zu minimierende Zielgröße ist hier der maximale Sättigungsgrad der Knotenpunktzufahrten.



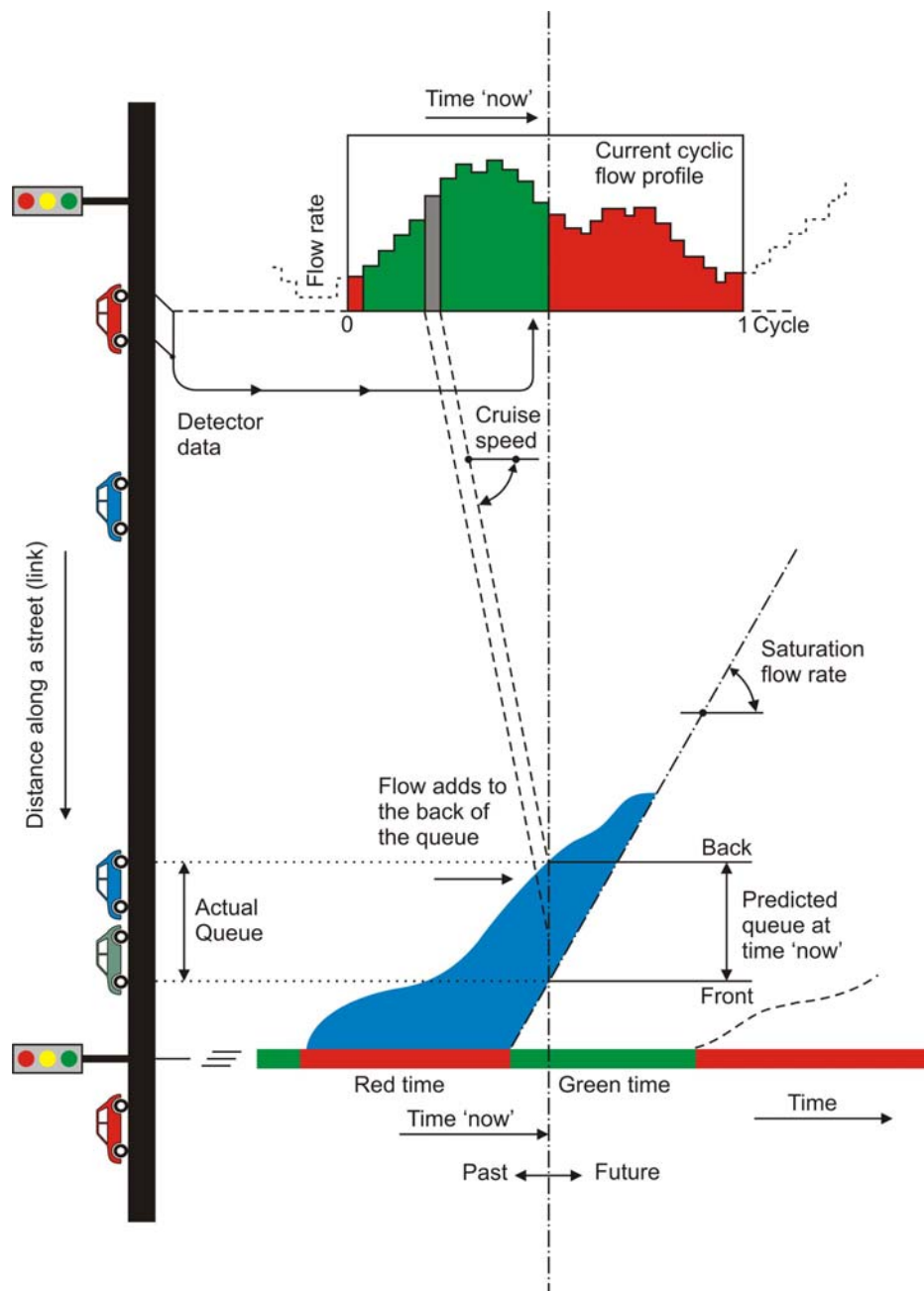


Abbildung 3: Verkehrsflussprofile in SCOOT (HUNT, ROBERTSON, BRETHERTON, 1981)

Der Versatzzeitenoptimierer überprüft in jedem Umlauf, ob eine Modifikation der Versatzzeit vorgenommen werden soll. Innerhalb der entsprechenden Zielfunktion wird anhand eines Güteindex überprüft, welche Versatzzeit zur Minimierung der Parameter Verlustzeit, Anzahl an Halten und Rückstaulänge führt. Innerhalb der Optimierung der Umlaufzeit wird alle 2-5min die Umlaufzeit so modifiziert, dass der höchstbelastete Knoten im Netz eine 90% Auslastung erfährt.

Das Verfahren SCOOT wird sukzessive weiterentwickelt und beinhaltet auch Methoden zur Priorisierung von Fahrzeugen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV-Fahrzeuge) sowie zur Abschätzung von Umweltbelastungen. Das Verfahren wird weltweit in über 200 Städten eingesetzt, u.a. in London, Peking und Bangkok.

Während seit den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts vor allem in britischen und amerikanischen Städten zunehmend (modellbasierte) Netzsteuerungsverfahren eingesetzt wurden, wurden in Deutschland bis in die 90er Jahre hinein vorwiegend lokale (regelbasierte) Steuerungen optimiert. Erst mit der Entwicklung der im Folgenden skizzierten Verfahren **MOTION** (Method for the Optimization of Traffic Signals In Online controlled Networks) (BUSCH, KRUSE, 1993) und **BALANCE** (BALancing Adaptive Network Control mEthod) (FRIEDRICH, KELLER, 1994) fanden die ersten modellbasierten Netzsteuerungsverfahren Eingang in die deutsche Planungspraxis.

Das Netzsteuerungsverfahren **MOTION** arbeitet auf drei funktionalen Ebenen. Innerhalb der strategischen Ebene werden Umlaufzeiten, mittlere Freigabezeitanteile, der Rahmen für die Phasenfolge sowie die Netzkoordinierung alle 5-15min optimiert. Auf der taktischen Ebene wird der aktuelle Umlauf ca. alle 60-90s (z.B. zur ÖPNV-Priorisierung) beeinflusst und auf der operationalen Ebene Freigabezeitanteile sekundengenau an die augenblickliche Verkehrsnachfrage angepasst (BUSCH, KRUSE, 1993). Ein besonderer Vorteil von MOTION ist die Unabhängigkeit von Detektorpositionen. So können sowohl Daten von Detektoren am Ausgang des Nachbar-knotens, in mittlerer Entfernung (ca. 150m vor der Haltlinie) als auch von haltliniennahen Detektoren verwendet werden, um das Verkehrsmodell zu aktualisieren. Dessen wesentlicher Nutzen liegt wiederum in der dynamischen Schätzung von Knotenstrombelastungen und Verkehrsströmen im Netz.

Systemtechnisch wird in MOTION zwischen einer zentralen und einer lokalen Ebene unterschieden. Auf der zentralen Ebene erfolgt die Modellierung des Verkehrs. Hier sollen Überlastungen auf einzelnen Kanten möglichst früh erkannt und Rahmensignalpläne entsprechend der Verkehrslage optimiert werden. Als Optimierungsmethode wird die Methode der Genetischen Algorithmen (vgl. Abschnitt 4.2.2) verwendet (BRAUN, 2008). Innerhalb der verwendeten Zielfunktion ist die Minimierung der verkehrlichen Kenngrößen Wartezeit und Anzahl an Halten definiert. Die alle 10-15min generierten Rahmensignalpläne werden dann an die lokale Ebene jedes Knotenpunktes im Netz übermittelt. Die Freigabezeiten werden hier anhand des bereitgestellten Rahmens und der augenblicklichen Verkehrslage entsprechend optimiert. Neben der Möglichkeit ÖPNV - Priorisierungsstrategien zu integrieren und Umweltbelastungen innerhalb eines Wirkungsmodells abzuschätzen kann das Verfahren um weitere Module (z.B. Parken, Fernverkehr (BUSCH, KRUSE, 1993)) erweitert werden.

Das modellbasierte Netzsteuerungsverfahren **BALANCE** (FRIEDRICH, 1999) ist wie MOTION in drei Ebenen gegliedert. Auf der obersten Ebene, der strategischen Ebene, werden verkehrspolitische Ziele innerhalb der hier definierten Zielfunktion berücksichtigt. Die gewichteten Wirkungskenngrößen Wartezeiten, Anzahl an Halte und Rückstaulängen werden innerhalb der Funktion linear miteinander kombiniert.

Auf der taktischen Ebene erfolgt die Lösung der Zielfunktion und damit die Optimierung der Netzsteuerung. Kern von BALANCE ist sein makroskopisches Verkehrsflussmodell. Anhand von aggregierten Daten haltliniennaher Detektoren, die von der lokalen Ebene übermittelt werden, werden hier für jeden Netzknoten Knotenströme erzeugt und anschließend Kantenbelastungen ermittelt. Mit Hilfe einer Methode zur Entropiemaximierung (WILLUMSEN, 1981) erfolgt die Schätzung jeder Quelle-Ziel Beziehung im Netz. Anhand von generierten Verkehrsflussprofilen (vgl. SCOOT) und Modellen können schließlich die Wirkungskenngrößen mittlere Wartezeiten, Anzahl an Halte und Rückstaulängen abgeschätzt werden. Für die Schätzung von mittleren

Rückstaulängen wird in der aktuellen Version von BALANCE das Verfahren nach MÜCK (MÜCK, 2002) genutzt, welches im folgenden Abschnitt 2.4 detailliert erläutert wird. Innerhalb des Optimierungsprozesses werden die Steuerungsparameter Freigabezeitanteile und Versatzzeiten variiert und in Form von Rahmensignalplänen an die lokale Ebene im zeitlichen Abstand von 5-15min übermittelt. Für die Optimierung wird der Hill-Climbing Algorithmus verwendet. Auf der lokalen Ebene erfolgt die Optimierung der Knotenpunktsteuerung. Mit Hilfe eines mikroskopischen Verkehrsmodells können hier Ankunfts Muster abgeschätzt und auf Basis dessen Freigabezeiten innerhalb der zeitlichen Rahmen optimal bemessen werden. Wesentlicher Vorteil von BALANCE ist die Möglichkeit, jede beliebige Steuerung auf der lokalen Ebene zu integrieren. So können auch optimierte Signalprogramme für Festzeitsteuerungen auf der taktischen Ebene erzeugt werden.

BRAUN (2008) ersetzte den in BALANCE verwendeten Hill-Climbing Algorithmus durch einen echtzeitfähigen **Genetischen Algorithmus** zur netzweiten **Optimierung (GALOP)**. Alle übrigen Komponenten und Modelle blieben in dieser Version unverändert. Wesentlicher Vorteil nach BRAUN (2008) ist die Möglichkeit, alle Steuerungsparameter gleichzeitig optimieren zu können. Im Rahmen von umfangreichen Feldtests konnte durch die Verwendung von GALOP anstelle des bisherigen Hill-Climbing Algorithmus eine Reduzierung der mittleren Wartezeit um 10% nachgewiesen werden.

Einen dezentralen Ansatz zur Optimierung von phasenbasierten Lichtsignalsteuerungen in Netzen wählt LÄMMER (2007) (vgl. Abbildung 4). Auf Basis einer Analyse der bisherigen zentralen Ansätze von Netzsteuerungsverfahren kommt er zu der Erkenntnis, dass nur ein dezentraler Ansatz die erforderliche Flexibilität der Steuerung an die augenblicklichen Verkehrsverhältnisse ermöglicht. Jede Knotenpunktsteuerung wird dabei lokal und unabhängig von den weiteren Steuerungen im Netz optimiert. Es erfolgt keine Kommunikation mit benachbarten Knoten oder mit einer zentralen taktischen Ebene. Die Knotenpunkte sind allein über die Verkehrsströme miteinander gekoppelt. Eine Koordinierung der einzelnen Knotenpunkte erfolgt daher nicht planerisch anhand von vordefinierten Versatzzeiten, sondern soll sich „von selbst einstellen, und zwar genau dann, wenn dadurch lokal Wartezeiten eingespart werden“ (LÄMMER, 2007). Die Steuerung besteht aus der Kombination von drei Verfahren: Prognose, Optimierung und Stabilität. Anhand der Zeitreihen von Fahrzeugankünften werden die Ankunfts Muster für den zukünftigen Bedienvorgang innerhalb des Prognoseverfahrens abgeschätzt. Im Rahmen einer heuristischen Optimierung wird jeder Phase ein Prioritätenindex dynamisch zugewiesen und die Phase mit dem höchsten Index bevorzugt bedient. Das Stabilitätsverfahren stellt sicher, dass trotz der Dezentralität und Verkehrsabhängigkeit der Steuerung die von KUMAR und SEIDMAN (1990) nachgewiesene Gefahr von Instabilitäten in vermaschten Netzwerken in Form von Rückkopplungsschleifen nicht auftritt. Im Rahmen von Laboruntersuchungen in einem Netzwerk mit neun signalisierten Knotenpunkten konnte LÄMMER (2007) zwar eine Reduzierung der Gesamtwartezeit um 39% nachweisen, jedoch bleibt die Qualität der umlaufzeitbasierten Referenzsteuerungen unklar.

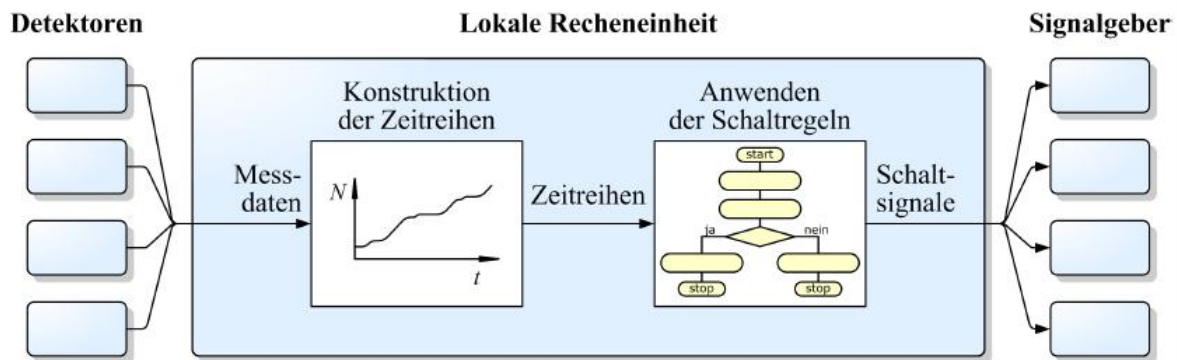


Abbildung 4: Lokale Recheneinheit innerhalb eines dezentralen Verfahrens (LÄMMER, 2007)

## 2.4 Methoden zur Erfassung und Schätzung von Rückstaulängen

Der Warteprozess und die damit verbundene Länge von Rückstau in den Zufahrten von Lichtsignalanlagen wird vom Ankunftsprozess der Fahrzeuge sowie vom Serviceprozess der Lichtsignalsteuerung bestimmt, d.h. insbesondere von der Länge der Freigabe- und Sperrzeiten.

GREENSHIELDS fand 1947 in seiner Arbeit heraus, dass der Ankunftsprozess im nicht gesättigten Zustand der Poissonverteilung folgt (GREENSHIELDS, SCHAPIRO, ERICKSEN, 1947). 1968 entwickelten DAWSON und CHIMINI ein Verfahren zur Beschreibung gestörter Verkehrsabläufe, welches verschiedene Zeitlückenverteilungen überlagert und transformiert. Einen wesentlichen Beitrag zur Beschreibung des Warteprozesses an Lichtsignalanlagen sowohl unter gesättigten als auch unter nicht-gesättigten Bedingungen entwickelten KIMBER und HOLLIS 1979. Mit Hilfe von Koordinatentransformationen konnten sie den angenommenen deterministischen Warteprozess im ungesättigten Zustand mit dem angenommenen stochastischen Warteprozess im übersättigten Zustand verknüpfen.

Sowohl für die Staubildung als auch für die Stauauflösung ist der Serviceprozess ein wichtiger Parameter. Neben der Länge der Freigabezeiten sind dabei fahrzeug- und fahrerspezifische Parameter wichtige Faktoren. So beeinflussen sowohl die Zusammensetzung der Fahrzeugtypen und deren Beschleunigungsvermögen als auch die Verteilung der Reaktionszeiten der Fahrer den Serviceprozess (GREENSHIELDS, SCHAPIRO, ERICKSEN, 1947).

Erste empirische Untersuchungen zur Rückstauauflösung führten GREENSHIELDS, SCHAPIRO und ERICKSEN in New York City 1947 durch. Anhand von Videoaufnahmen (ein Bild pro 0,68s) an mehreren signalisierten Knotenpunkten und einem Abstandlinienraster (vgl. Abbildung 5) konnten erste Zusammenhänge zwischen der Distanz zur Haltlinie und der verstrichenen Zeit nach Freigabezeitbeginn bis zum tatsächlichem Anfahren der wartenden Fahrzeuge aufgezeigt werden. Anstelle der fehlenden Fahrbahnmarkierungen wurde dabei vereinfacht eine gedachte Verlängerung der Bordsteinkante der kreuzenden Straße als Haltlinie angenommen.



**Abbildung 5: Empirische Untersuchungen zum Anfahrverhalten (GREENSHIELDS, SCHAPIRO, ERICKSEN, 1947)**

Eine zuverlässige Abschätzung der Rückstaulänge ist somit eng verknüpft mit einer zuverlässigen Abschätzung der Ankunfts- und Servicerate. Eine bereits in der Praxis erfolgreich erprobte Methode, um anhand von Schleifendetektoren auf die mittlere Länge des maximalen Rückstaus zu folgern, stellte MÜCK 2002 vor. Dabei nutzt der von MÜCK entwickelte Rückstauschätzer Prozessdaten haltliniennaher Detektoren, die zur Zeitlückenbemessung dienen. In der Regel befinden sich diese in einem Abstand von ca. 15-50m zur Haltlinie. MÜCK (2002) differenziert den zu schätzenden Rückstau nach einer gesicherten Länge  $L_1$  (Rückstau zwischen Detektor und Haltlinie) sowie einem zu schätzenden Anteil  $L_2$  (Fahrzeuge stromaufwärts des Detektors). Als Kenngröße wird die so genannte Füllzeit  $dt$  verwendet, die als Zeitintervall zwischen Sperrzeitbeginn und Dauerbelegung des haltliniennahen Detektors definiert wird. Für jeden Fahrstreifen bzw. Knotenstrom werden individuelle Referenzdauern bzw. Grenzwerte  $dt_0$  für die Füllzeit anhand von empirischen Untersuchungen bestimmt. Im Falle einer Referenzdauerunterschreitung ( $dt \leq dt_0$ ) wird angenommen, dass ein gesättigter Verkehrsfluss vorliegt. MÜCK (2002) konnte aufzeigen, „dass die Häufigkeit für die Unterschreitung dieser Vergleichsdauer bis zu einem gewissen Grad mit der Staulänge korreliert.“

Abbildung 6 zeigt den angenommenen linearen Zusammenhang zwischen einem definierten Staukennwert  $\delta$  ( $\delta = 0$  für  $dt > dt_0$ ;  $\delta = 1$  für  $dt \leq dt_0$ ) und der maximalen, geglätteten Rückstaulänge  $\bar{L}$  anhand einer Beispielmessung. Nach MÜCK (2002) können mit diesem Verfahren, welches auch Eingang in das adaptive Netzsteuerungsverfahren BALANCE (FRIEDRICH, KELLER, 1994) gefunden hat, Rückstaulängen bis zum 5- bis 10-fachen des Abstandes zwischen Detektor und Haltlinie zuverlässig abgeschätzt werden.

Rückstaulängen, die eine geringere räumliche Ausprägung haben als der Abstand zwischen Detektor und Haltlinie können methodenbedingt hingegen nicht abgeschätzt werden. Zudem ist die Messgenauigkeit von den verwendeten Schleifendetektoren insbesondere im innerstädtischen Bereich teilweise stark eingeschränkt, so dass Ungenauigkeiten bei bestimmten Randbedingungen von bis zu 20% auftreten können (CERTU, 2001, LEHNHOFF, 2005). Insbesondere bei Geschwindigkeiten  $< 30\text{km/h}$  nimmt die Erfassungsqualität deutlich ab (FRIEDRICH, HEINRICH, POHLMANN, 2007).

Neben der beschriebenen, traditionellen Detektorik in den Zufahrten von Lichtsignalanlagen mit Induktionsschleifen werden im innerstädtischen Bereich sukzessive fortschrittliche Videodetektionssysteme eingesetzt. Dabei besteht ein System aus den drei Komponenten elektro-optischer Sensor (Videokamera), einem Framegrabber sowie einer Rechen- und Steuereinheit mit Auswertelgorithmen. Im Bereich von Lichtsignalanlagen werden die zumeist festinstallierten Kameras an vorhandenen Infrastrukturelementen (z.B. Peitschenmasten) über der Fahrbahn angebracht. Für die automatische Fahrzeugdetektion sind die Arbeitsschritte: Bildvorverarbeitung, Objektsegmentierung (Differenzierung: Objekt-Hintergrund) und eine spezielle Signalverarbeitung notwendig (FRIEDRICH, HEINRICH, POHLMANN, 2007, LEICH, FLIEß, JENTSCH, 2001).

Wesentlicher Vorteil der Videodetektion gegenüber der Verwendung von Schleifendetektoren ist zum einen die Möglichkeit, mehrere Fahrstreifen mit einer Videokamera zu scannen und zum anderen räumliche Abschnitte (Fahrstreifen) zu detektieren (WREN, HUTCHINSON, 2004). HIGASHIKUBO, HINENOYA und TAKEUCHI nutzten das Potential der räumlichen Detektion, um mit Hilfe spezieller Bildverarbeitungsverfahren Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen abzuschätzen. Aufgrund von Bildrauschen bei der Objektsegmentierung sowie Einschränkungen in der Sichtbarkeit der erfassten Bildausschnitte kann die Länge von Rückstau (max. 150m) allerdings nicht direkt ermittelt sondern nur angenähert werden (HIGASHIKUBO, HINENOYA, TAKEUCHI, 1997, ZHENG, WANG, NIHAN et al., 2006). Diese Schwierigkeiten führen auch dazu, dass die technischen Vorteile der räumlichen Erfassung im Rahmen von Lichtsignalsteuerungen kaum genutzt werden. FRIEDRICH, HEINRICH und POHLMANN merken an, dass es „sich oftmals um einen einfachen Austausch von Technologien ohne einen Mehrwert für die Steuerung der Lichtsignalanlage selbst“ handelt.

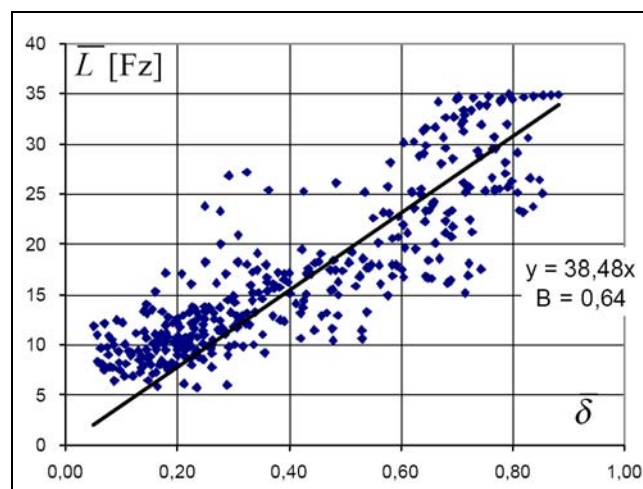


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der maximalen Staulänge  $L$  [Fz] und dem geglätteten Stau-Kennwert  $\delta$  [-] (MÜCK, 2002)



Neben der stationären Datenerfassung mit Induktionsschleifen- und Videodetektoren können prinzipiell auch fahrzeugseitig generierte Daten genutzt werden, um Staus bzw. Störungen im Verkehrsablauf zu erkennen und deren räumliche Ausdehnung abzuschätzen (BELZNER, 2007). Von speziell ausgerüsteten Fahrzeugen (z.B. Taxiflotten) werden kontinuierlich per GSM-Netz aggregierte Positions- und Geschwindigkeitsdaten an eine Zentrale übermittelt. Durch den Abgleich der fahrzeuggenerierten Reisezeiten mit Referenzzeiten bei geringer Netzauslastung kann die Verkehrslage abgeschätzt werden. Die so genannten Floating Car Data (FCD) bzw. Extended Floating Car Data (XFCD) werden auf Grund ihrer geringen Auflösung und der Systemarchitektur allerdings bisher nicht zur Rückstauschätzung an Lichtsignalanlagen verwendet.

Ein interessanter Ansatz, der bereits in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts verfolgt wurde, ist die Beobachtung des Verkehrsablaufs aus einem fahrenden Fahrzeug in der Gegenrichtung (WARDROP, CHARLESWORTH, 1954). Mit Hilfe spezieller physischer Sensorik im so genannten Floating Car Observer (FCO) können Störungen bzw. Staus im Gegenverkehr erkannt und gemeldet werden. Der Charme dieser Methode liegt in der Beobachtung des Verkehrsablaufs aus dem Gegenverkehr. „Ein FCO begegnet sozusagen der „relativen Zukunft“ entgegenkommender Fahrzeuge und kann diese den nachfolgenden Fahrzeugen im Gegenverkehr direkt kommunizieren“ (HOYER, KÜHNEL, 2008). Im Rahmen des Forschungsprojektes VAGABUND<sup>1</sup> wurde das Prinzip des FCO im innerstädtischen Bereich angewendet werden. Mit speziell ausgerüsteten Nahverkehrsfahrzeugen wurde die Verkehrslage in Straßenräumen, in denen sich der motorisierte Individualverkehr (MIV) und Fahrzeuge des ÖPNV den Straßenraum teilen, erfasst. Auf diese Weise können Verspätungen frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden (HOYER, KÜHNEL, 2008).

---

<sup>1</sup> VAGABUND – Verbesserte Datenerfassung durch Analyse des Gegenverkehrs im ÖPNV (VM 2010 – Projekt), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Laufzeit von 04/2004 bis 03/2009.





## **3 Fahrzeugkommunikation in städtischen Straßennetzen**

### **3.1 Funktionsweise**

Die Entwicklung von kostengünstigen WLAN-Standards in Verbindung mit der Möglichkeit der zivilen Nutzung von GPS-Daten eröffnet ein neues Datenpotential an fahrzeuggenerierten Kommunikationsdaten (V2X-Kommunikationsdaten) für verschiedene Applikationen (DAHSTINEZHAD, NADEEM, DOROHONCEANU et al., 2004). Ein wichtiger Anwendungsbe- reich, der davon zukünftig profitieren kann, sind intelligente Transportsysteme. Derzeitig be- beschäftigen sich Automobilhersteller weltweit mit der drahtlosen Kommunikation zwischen Fahr- zeugen untereinander und Infrastrukturelementen. Für die Kommunikation mit Elementen der Infrastruktur sind stationäre Basisstationen notwendig, die in vorhandener Verkehrsinfrastruktur wie Schilderbrücken oder Lichtsignalanlagen integriert sind oder als so genannte Road Side Units (RSUs) baulich ergänzt werden müssen. Die angestrebten Applikationen der V2X- Kommunikation reichen von reiner Unterhaltung über verbesserte Navigation und Fahrerassis- tenz bis zum selbstorganisierenden Verkehr (LÜBKE, 2004).

Zusammen mit Forschungseinrichtungen und Unternehmen der Kommunikation sind die welt- weit führenden Automobilhersteller im Car 2 Car Communication Consortium<sup>2</sup> (C2CC) organi- siert. Aufgabe dieses europäischen Konsortiums ist u.a. die Festlegung und Sicherstellung einheitlicher Industriestandards für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander und der Infrastruktur. Ähnliche Standards wurden bereits in den USA und Japan definiert.

Sobald sich mindestens zwei kommunikationsfähige Fahrzeuge innerhalb der Kommunikations- reichweite befinden, erfolgt automatisch und spontan eine Funkverbindung zwischen den ein- zelnen Kommunikationspartnern und es entsteht ein selbstorganisierendes Ad-Hoc Netzwerk. Jedes kommunikationsfähige Fahrzeug innerhalb des Netzwerkes fungiert dabei als Sender und Empfänger. Wenn die Entfernung zwischen Sender und Empfänger die Kommunikations- reichweite übersteigt, können die Informationen über Zwischenknoten (Hops) weitergeleitet werden. Dies können z.B. Fahrzeuge sein, die sich im Gegenverkehr befinden. Erfolgt die Nachrichtenübertragung über mehrere Zwischenknoten, wird dies als Multi-Hop bezeichnet. Der verwendete Routing-Algorithmus basiert auf den Positionen der kommunikationsfähigen Fahr- zeuge und ist in der Lage, auf Veränderungen innerhalb der Netztopologie schnell zu reagieren

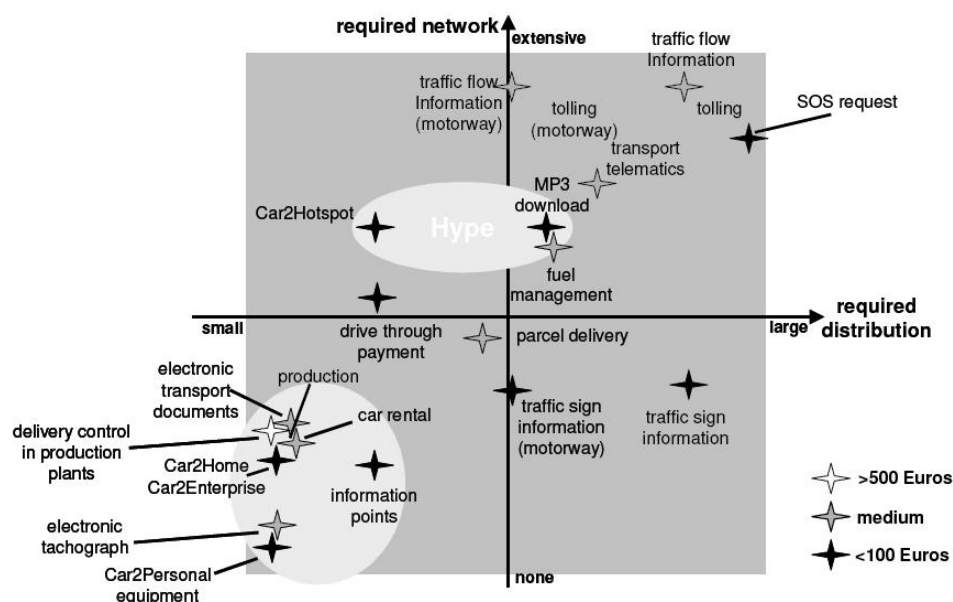
---

<sup>2</sup> <http://www.car-to-car.org>

(MAUVE, HARTENSTEIN, FÜßLER et al., 2000). Das C2CC geht bei idealen Bedingungen (u.a. geringe Abschattungen) von Kommunikationsreichweiten von bis zu 1000m aus (CAR-2-CAR-CC, 2007). Bezüglich des Sendens von Nachrichten wird zwischen dem Broadcastmodus und einer direkten Punkt-zu-Punkt Verbindung unterschieden. Während im Rahmen vom Broadcastmodus die gesendete Nachricht allen potentiellen Empfängern innerhalb der Reichweite zur Verfügung steht und die Empfänger selbstständig entscheiden, ob die empfangende Nachricht für sie relevant ist, erhält im Zuge der Punkt-zu-Punkt Verbindung nur ein bestimmter Empfänger mit bekannter IP-Adresse die gesendete Information.

Die Mehrheit der laufenden und bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben im Bereich von V2X-Kommunikation betrachteten Applikationen im Bereich der aktiven Sicherheit. Durch Übermittlung von Gefahrenwarnungen zwischen den Verkehrsteilnehmern soll hier der Erfassungshorizont des Fahrers erweitert und das Unfallrisiko aktiv verringert werden. Insbesondere in Japan wird für diese Applikation spezielle Sensorik an gefährlichen und unübersichtlichen Straßenverläufen installiert, die den Verkehrsteilnehmer anhand von übermittelten Informationen warnen soll (FRANZ, 2004).

Das C2CC unterscheidet mögliche V2X-Applikationen hinsichtlich der Szenarios Verkehrssicherheit, Verkehrseffizienz sowie Unterhaltung und Sonstiges. Die Güte und Funktionalität der einzelnen Applikationen wird dabei wesentlich von der Penetrationsrate an kommunikationsfähigen Fahrzeugen bzw. Infrastrukturelementen beeinflusst. Insbesondere vor diesem Hintergrund wurden für die Markteinführung zahlreiche Applikationen im Bereich Unterhaltung definiert, die unabhängig von den Penetrationsraten einen Mehrwert in Form eines Komfortgewinns für den Nutzer liefern. Einen Überblick ausgewählter Möglichkeiten für den Einsatz von V2X-Kommunikation in Abhängigkeit von den zu erwartenden Nutzerkosten und benötigten Penetrationsraten zeigt Abbildung 7. Die hell hervorgehobenen Anwendungen im Bereich niedriger Penetrationen sind insbesondere für die Markteinführung vorgesehen. Alle weiteren Anwendungsbereiche, inkl. der mit dem Wort „Hype“ gekennzeichneten Applikationen im Zuge der Markteinführung, implizieren ein aus mehreren Partnern bestehendes Geschäftsmodell.



**Abbildung 7: Kategorisierung von V2X-Applikationen nach monetären Kosten und benötigter Penetrationsrate (MATHEUS, MORICH, LÜBKE, 2004)**

### 3.2 Einsatzfelder von Fahrzeugkommunikation in Städten

Im Fokus der folgenden Skizzierung ausgewählter Anwendungsbereiche für V2X-Kommunikationstechnologie, stehen Applikationen in urbanen Straßennetzen, die zur Verbesserung des Verkehrsablaufs oder der Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen sollen.

Die ausgewählten Applikationen werden dabei hinsichtlich ihrer Kommunikationsart differenziert nach:

- V2V-Applikationen: Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander,
- I2V-Applikationen: Austausch von Informationen zwischen Elementen der Infrastruktur (RSUs) und Fahrzeugen und
- V2I-Applikationen: Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Elementen der Infrastruktur (RSUs).

Applikationen von V2V-Kommunikation haben ihren bisherigen Schwerpunkt im Fernstraßennetz. Im Fokus stehen hier Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer vor z.B. Unfällen, Hindernissen und Stauenden warnen, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte entwickeln auf Basis des IEEE 802.11p-Standards Demonstratoren für die genannten Anwendungsbereiche. Im innerstädtischen Verkehrsraum finden sich hingegen nur wenige Applikationen, die ausschließlich auf V2V-Kommunikationsdaten basieren. Exemplarisch wird im Folgenden der *Kreuzungsassistent* betrachtet.

Der Kreuzungsassistent soll den Fahrer im Bereich von komplexen Kreuzungssituationen durch geeignete Fahrhinweise unterstützen. Im Rahmen der Applikation Kreuzungsassistenz der Forschungsinitiative AKTIV<sup>3</sup>-AS (Aktive Sicherheit) wird der Fahrer durch entsprechende Fahrhinweise auf Gefahrensituationen aufmerksam gemacht. Bei Nichtbeachtung der Fahrhinweise erfolgt eine Warnung bevor aktiv in den Antrieb bzw. die Bremse bei wiederholter Nichtbeachtung der Fahrhinweise eingegriffen wird. Ziel dieser V2V-Kommunikation ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit im Knotenpunktbereich. Der Kreuzungsassistent nutzt dazu umfangreiche, im Fahrzeug integrierte Sensorik in Verbindung mit Positionierungsdaten und digitalen Karten sowie V2V-Kommunikationsdaten für eine umfassende Situationsanalyse. Die Integration der V2V-Kommunikationstechnologie in die Systemarchitektur des Kreuzungsassistenten ermöglicht die Detektion von sich außerhalb des Sichtbereichs befindlichen Objekten, die z.B. durch Gebäude oder Bäume verdeckt sind (BENMIMOUN, CHEN, SUZUKI, 2007).

Bereits 1983 wurde im Rahmen des Demonstrationsprojekts „Wolfsburger Welle“ der Volkswagen AG eine I2V-Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen in Deutschland realisiert, die auf Infrarottechnik (IR-Technik) basiert. „Das Prinzip der „Wolfsburger Welle“ besteht darin, den Kraftfahrer in speziell ausgerüsteten Fahrzeugen kontinuierlich über seine Relativposition zur Freigabezeit an der nächsten Lichtsignalanlage zu informieren, so dass durch die Wahl einer geeigneten Geschwindigkeit die Haltlinie dieser Lichtsignalanlage möglichst bei „Grün“ überfahren werden kann“ (HOFFMANN, 1989). Durch die in das Fahrzeug

---

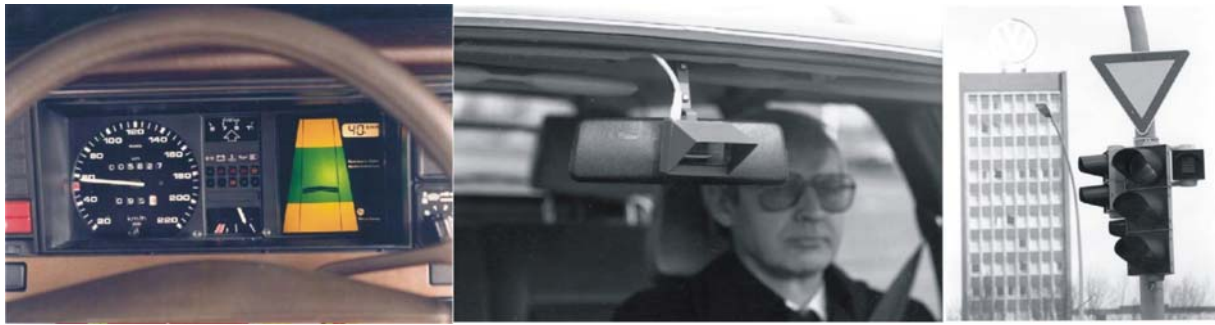
<sup>3</sup> AKTIV ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderte Forschungsinitiative bestehend aus den Bereichen Verkehrsmanagement (-VM), Aktive Sicherheit (-AS) und Cooperative Cars. AKTIV steht für „Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr“, Laufzeit: 10/2006 – 12/2010

übertragenen Empfehlungen anstelle der zu dieser Zeit häufig verwendeten ortsfesten, dynamischen Geschwindigkeitssignale im Zuge Grüner Wellen, sollte eine wesentlich höhere Akzeptanz der Geschwindigkeitsempfehlungen und somit eine Verbesserung des Verkehrsablaufes erzielt werden (ZIMDAHL, 1983). Die Systemarchitektur umfasste einen Infrarotsender an der Lichtsignalanlage, der ausgewählte Informationen (Umlaufzeiten, Restzeiten) von der LSA in das Fahrzeug überträgt sowie einen Bordrechner im Fahrzeug, welcher auf Basis der empfangenden Lichtsignalanlagedaten (LSA-Daten) und einem im Fahrzeug befindlichen Wegimpulszähler die Relativposition zur Freigabezeit auf einer Anzeigeeinrichtung im Fahrzeug darstellt (Abbildung 8).

Die Anzeigeeinrichtung, welche im Armaturenbrett integriert ist, umfasst ein dreigeteiltes trapezförmiges Feld (vgl. Abbildung 8 (links)). Die Relativposition des Fahrzeuges ist als Balken in die Anzeige integriert. Befindet sich der Balken im mittleren (grünen) Feld, welches die Grünbandbreite für den jeweiligen Streckenabschnitt darstellt, kann der Fahrer bei Beibehaltung der aktuellen Geschwindigkeit die nächste Lichtsignalanlage ohne Halt passieren. Je höher der Balken sich innerhalb des mittleren Feldes befindet, desto eher wird das Fahrzeug nach Grünzeitbeginn an der Lichtsignalanlage eintreffen. Befindet sich der Balken im unteren bzw. oberen Feld des Trapezes (dargestellt in gelb), so bewegt sich das Fahrzeug hinter bzw. vor der grünen Welle und kann ein haltfreies Passieren nur durch eine modifizierte Fahrweise (beschleunigen bzw. abbremsen) erreichen.

Im Rahmen von Vorher-Nachheruntersuchungen auf einem 3,6km langen Straßenzug mit insgesamt 11 Lichtsignalanlagen in Wolfsburg konnte bei geringen Verkehrsstärken eine Verbesserung des Verkehrsablaufs in Form von Reduzierungen der mittleren Reisezeit und Anzahl an Halten erzielt werden. Allerdings zeigte sich auch, dass eine Nichtberücksichtigung bzw. fehlende Detektion der aktuellen Verkehrslage im Bereich der signalisierten Knotenpunkte dazu führte, dass das System „während Zeiten starker Verkehrsbelastungen wenig wirksam ist und [...] keine Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs – begleitet von erhofften Kraftstoffeinsparungen – erzielt werden kann. Das liegt einerseits an den dann auftretenden Stausituationen [...], andererseits erfordert die richtige Umsetzung der Empfehlungen des Informationssystems einen Handlungsspielraum beim einzelnen Kraftfahrer hinsichtlich der Geschwindigkeitswahl, der dann kaum gegeben ist“ (HOFFMANN, 1989).

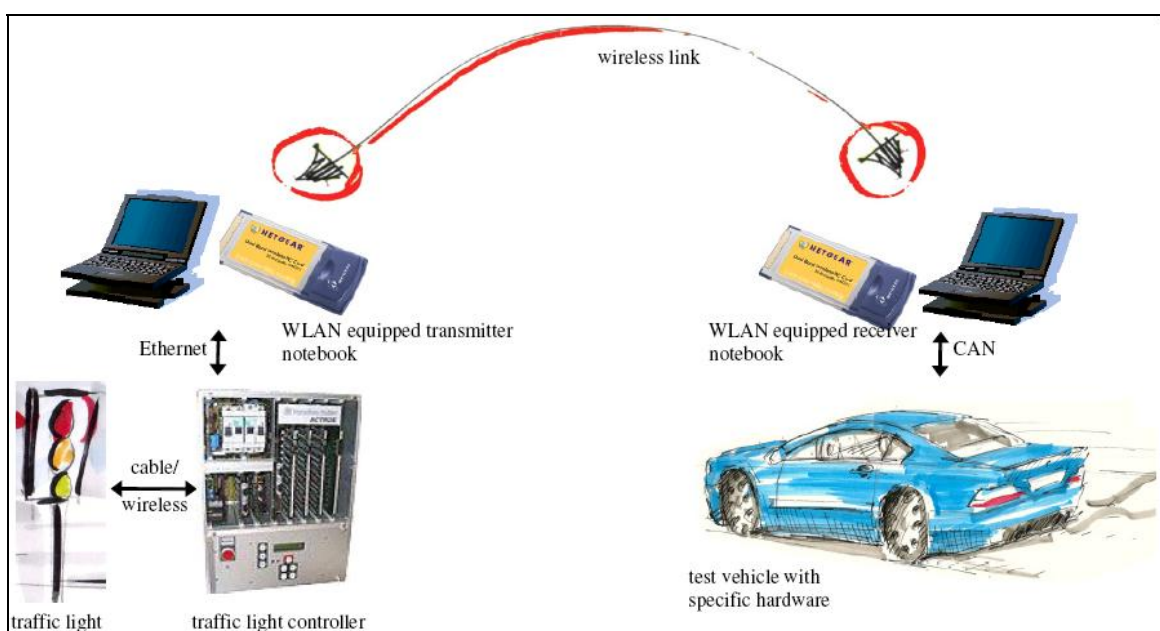
Zudem zeigte sich in den Feldversuchen, dass Versuchsfahrer, aufgrund der „Konkurrenzsituation“ auf der Straße, Geschwindigkeitsempfehlungen von 40km/h bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60km/h nicht akzeptierten bzw. im Falle einer relativen Fahrzeugposition im unteren Trapezfeld (später ersetzt durch Dioden im Tachometer) zu erheblichen Geschwindigkeitsüberschreitungen verleitet werden. Nicht zuletzt scheiterte das System „Wolfsburger Welle“ neben den genannten Akzeptanzproblemen auch an den für damalige Verhältnissen hohen Zusatzkosten von ca. 2.600€ (5.000DM) für den Endkonsumenten.



**Abbildung 8: Elemente der „Wolfsburger Welle“: Anzeige der Relativposition und Geschwindigkeitsempfehlung (links), IR-Empfänger im Fahrzeug (mitte), IR-Sender an der LSA (ZIMDAHL, 1983)**

Die Idee der „Wolfsburger Welle“, dem Fahrer Geschwindigkeitsempfehlungen zum haltfreien Passieren des nächsten signalisierten Knotenpunkts im Fahrzeug anzuzeigen, ist als eine Applikation zur Verbesserung der Verkehrsqualität innerhalb des Manifestes des C2CC definiert worden (CAR-2-CAR-CC, 2007).

Im Zuge der europäischen Forschungsinitiative „Prevent“ wurde im Rahmen des Teilprojekts „INTERSAFE“ die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage für die Applikation Rotlichtassistent auf Basis des IEEE 802.11a Standards realisiert (FUERSTENBERG, HOPSTOCK, OBOJSKI et al., 2007). Ziel dieses Fahrerassistenzsystems ist die Reduzierung von Rotlichtmissachtungen und damit die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Nähert sich während einer Freigabezeit ein Fahrzeug einer kommunikationsfähigen Lichtsignalanlage, so wird anhand der kommunizierten Restzeiten sowie der augenblicklichen Geschwindigkeit und Position des Fahrzeugs überprüft, ob das Fahrzeug die Haltlinie während der augenblicklichen Phase überqueren kann. Ist dies aufgrund der verbleibenden Freigabezeitdauer nicht möglich, wird der Fahrer darüber informiert sowie visuell und akustisch gewarnt. Betrachtet werden hier ausschließlich Anlagen mit Festzeitsteuerungen. Die verwendete Systemarchitektur ist im nachfolgenden Bild dargestellt.



**Abbildung 9: Systemarchitektur Rotlichtassistent (FUERSTENBERG, HOPSTOCK, OBOJSKI et al., 2007)**

Die Grundidee des Forschungsprojektes „Travolution“<sup>4</sup> basiert auf dem zur „Wolfsburger Welle“ verwandten Konzept des informierten Fahrers (MENIG, 2008, MENIG, BUSCH, 2006). Dabei werden die beiden Anwendungsfälle Restrotanzeige und Dynamische Grüne Welle mit Hilfe einer I2V-Kommunikation zwischen Lichtsignalanlage und Fahrzeug entwickelt und im Rahmen von Demonstratoren in der Stadt Ingolstadt an drei Lichtsignalanlagen und zwei Fahrzeugen umgesetzt. Das Konzept beinhaltet folgende Ziele und Eigenschaften durch I2V-Kommunikation:

- Keine Einschränkungen für den Fahrer und die Verkehrssicherheit und
- Erhöhung des individuellen Fahrkomforts und der Verkehrseffizienz.

Eine Erhöhung der Kapazität der Lichtsignalanlage durch eine Anzeige von Restrotanzeigen im Fahrzeug im Vergleich zu einer kollektiven Aktorik im Seitenraum ist nach BRAUN, KEMPER, MENIG et al. (2009) nicht zu erwarten. Der wesentliche Vorteil einer solchen Anzeige liege vielmehr in der positionsunabhängigen Anzeige der Steuerungsinformationen für den Fahrer, die unabhängig von Sichtachsen und möglichen Verdeckungen durch große Objekte im Straßenraum ist (BRAUN, KEMPER, MENIG et al., 2009).

Die verwendeten Systemkomponenten der „Wolfsburger Welle“ finden sich grundsätzlich auch in der Systemarchitektur von Travolution wieder (vgl. Abbildung 10 (links)). Als Kommunikationsmedium wird anstelle der damaligen IR-Technik Funkübertragungstechnik verwendet, die dem WLAN Standard 802.11 genügt. Durch die Einbeziehung des CAN-Bus (**C**ontroller-**A**rea-**N**etwork-Bus) in die Systemarchitektur, der für die Bereitstellung fahrzeuggenerierter Daten (aktuelle Geschwindigkeit, Aktivierung des Blinkers) genutzt wird, können zudem Fahrtwünsche bei der Bereitstellung von Restzeiten berücksichtigt werden. Das im Fahrzeug befindliche Car-2-Car-Modul ist neben dem positions- und richtungsabhängigen Verbindungsaufbau zur nächsten Lichtsignalanlage auch für die Zuordnung der relevanten Signalgruppe und der zu erwartenden Restzeit für den gewählten Fahrtwunsch verantwortlich. Auf Basis der übermittelten Daten der Lichtsignalanlage und des CAN-Bus werden schließlich Empfehlungen für die Applikationen Restrotzeit und Dynamische Grüne Welle generiert und dem Fahrer im Fahrzeug angezeigt (vgl. Abbildung 10 (mitte, rechts)). Dabei entspricht die Form und Funktion der Darstellung der Geschwindigkeitsempfehlungen im Fahrzeug dem gewählten Design im Rahmen des Projekts „Wolfsburger Welle“ (vgl. Abbildung 8).

Eine wichtige Voraussetzung für die genannten Applikationen in Travolution ist die Kenntnis der Restzeiten in naher Zukunft. Festzeitgesteuerte Lichtsignalanlagen verhalten sich diesbezüglich deterministisch; die Restzeitprognose ist damit trivial. Demgegenüber stehen jedoch (teil- bzw.) vollverkehrsabhängige Steuerungsverfahren, die ihre Phasenfolgen und -dauern der aktuellen Verkehrssituation anpassen und damit eine Schaltbildprognose äußerst diffizil machen. Auf Basis von Markow-Ketten, die zur Beschreibung des Steuerungsprogramms verwendet werden (GNEDENKO, 1980), konnte im Rahmen von Travolution eine Algorithmik entwickelt werden, die eine Prognose der Schaltbilder für die nächsten 10-60s mit einer Genauigkeit von 1s ermöglichen soll (MENIG, 2008).

---

<sup>4</sup> Travolution ist ein vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie gefördertes Forschungsprojekt, das gemeinsam vom Lehrstuhl für Verkehrstechnik der TU München, der GEVAS software GmbH, der Audi AG und der Stadt Ingolstadt durchgeführt wurde.

Die Notwendigkeit der bislang unberücksichtigten Erfassung bzw. Abschätzung der Verkehrslage in den Zufahrten der Lichtsignalanlagen erkennt auch Menig (2008): „Die genannte Problematik der Berücksichtigung von Rückstaus bei der Berechnung einer Geschwindigkeitsempfehlung bedarf noch weiterer Forschung.“ Bei einer verkehrslageunabhängigen Bereitstellung von Empfehlungen ist nach den Erfahrungen der „Wolfsburger Welle“ eine Reduzierung der Güte und Akzeptanz der generierten Geschwindigkeitsempfehlungen bei zunehmender Verkehrsnachfrage zu erwarten.

Ein äquivalenter Ansatz zur Information des Fahrers wird im Konsortialprojekt AKTIV-VM im Teilprojekt Kooperative Lichtsignalanlage gewählt. Hier wird der Fahrer über einen handelsüblichen Personal Digital Assistant (PDA) über den aktuellen Signalstatus und die entsprechenden Restrotzeiten der nächsten Lichtsignalanlage informiert (vgl. Abbildung 11). Befindet sich das Fahrzeug innerhalb eines koordinierten Streckenzugs erhält der Fahrer zudem eine Information über die Relativposition des Fahrzeuges innerhalb der Grünen Welle. Auf eine Abschätzung und Anzeige einer optimalen Geschwindigkeit wird in AKTIV-VM bewusst verzichtet, da die geringe Anzahl an Demonstratoren eine hierfür notwendige Abschätzung der Rückstaulängen nicht zulässt. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage wird durch eine Road Side Unit realisiert, die über eine LAN-Verbindung Informationen aus dem Steuergerät empfangen und diese per 802.11g-Standard an die PDA im Fahrzeug übermitteln kann. Dabei werden die aktuellen Schaltinformationen für alle Zufahrten per Broadcast an alle kommunikationsfähigen Fahrzeuge gesendet. Anhand der Positionsdaten des Fahrzeuges werden innerhalb des PDA die zufahrtsspezifischen Informationen gefiltert und dem Fahrer angezeigt.

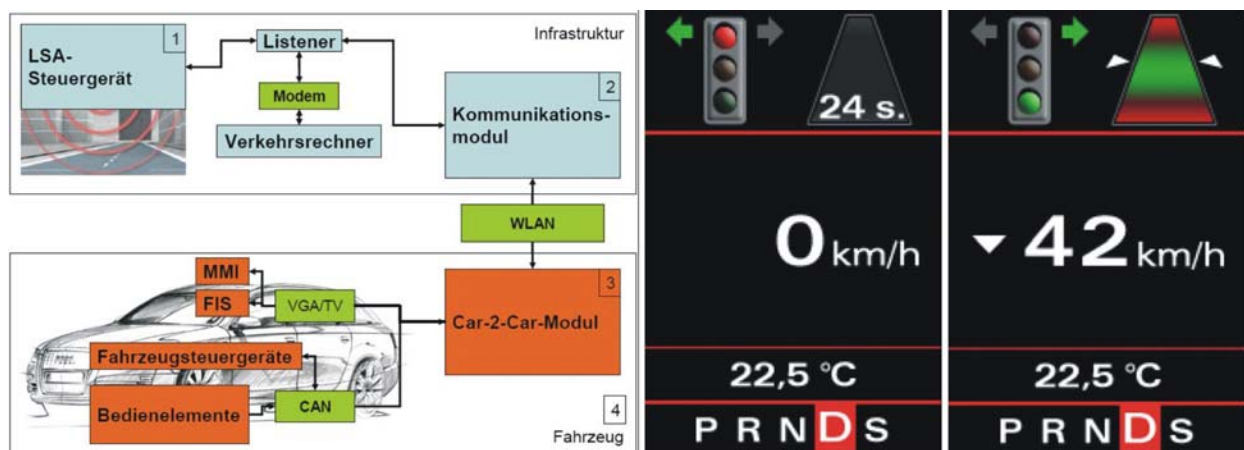


Abbildung 10: Systemarchitektur des Projektes Travolution (links), Restrotanzeige (Mitte), Geschwindigkeitsempfehlung (rechts) (MENIG, 2008)





**Abbildung 11: Visualisierung von Lichtsignalanlagen - Informationen in AKTIV-VM (OTTO, HOYER, 2009)**

### 3.3 Konzepte für Lichtsignalsteuerungen unter Nutzung von Kommunikationsdaten

WAGNER, AMME, ERNST et al. (2009) untersuchten im Rahmen von Simulationsstudien an bis zu drei signalisierten Knotenpunkten in Braunschweig, inwieweit eine kommunikationsdatenbasierte Detektorik die traditionelle Schleifendetektorik vollständig ersetzen kann. Das im realen Netz existierende verkehrsabhängige Steuerungsverfahren bleibt in dieser Untersuchung unverändert. Kommunikationsfähige Fahrzeuge werden hier als virtuelle Detektoren interpretiert. In Abständen von 5, 40 und 80m vor der Haltlinie befinden sich Schleifendetektoren in den Zufahrten, die ausschließlich die Existenz kommunikationsfähiger Fahrzeuge detektieren können. Auf Basis von Zeitlücken erfolgt entsprechend dem bestehenden regelbasierten Steuerungsverfahren die Entscheidung, ob eine Phase gewechselt werden soll.

Mit Hilfe des mikroskopischen Verkehrsflusssimulators VISSIM konnte aufgezeigt werden, dass erst bei Ausstattungsraten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen von mehr als 50% ein signifikanter Nutzen erzielt werden kann. In diesen Szenarios konnte die Verlustzeit im Vergleich zu einem Szenario mit Festzeitsteuerung um bis zu 15% reduziert werden. Eine differenzierte Analyse der einzelnen Ströme in Haupt- und Nebenrichtung erfolgte allerdings nicht. Abschließend merken die Autoren an, dass die Verwendung von Kommunikationsdaten im Rahmen heutiger Steuerungsverfahren nicht zielführend ist. Es müssten vielmehr Steuerungsverfahren entwickelt werden, welche die in Zukunft zur Verfügung stehenden Protokollinhalte der Kommunikationsdaten (Trajektorien, Route, aktuelle Geschwindigkeit) optimal nutzen. Zudem seien die zu entwickelnden Steuerungsverfahren auch für geringe Ausstattungsraten zu konzipieren.

Im Rahmen einer Simulationsstudie an zwei signalisierten Knotenpunkten in Bukarest (Rumänien) zeigen GRADINESCU, GORGORIN, DIACONESCU et al. (2007) wie der Informationsgehalt von V2I-Kommunikationsdaten innerhalb adaptiver Steuerungsverfahren in der Zukunft sinnvoller genutzt werden kann, um den Verkehrsfluss in städtischen Straßennetzen zu verbessern und damit Emissionen zu reduzieren. Innerhalb einer angenommenen Reichweite von bis zu 250m senden kommunikationsfähige Fahrzeuge periodisch ihre augenblickliche Position in Form von WGS 84 Koordinaten, ihre spezifische Fahrzeug-ID, die momentane Geschwindigkeit sowie die Richtung und den entsprechenden Zeitstempel an die Lichtsignalanlage. Auf Basis dieser Eingangsdaten und planerischen Randbedingungen, wie minimale Freigabezeiten und



Zwischenzeiten von Fußgängerströmen, wird innerhalb des aktuellen Umlaufs die darauf folgende Umlaufzeit mit Hilfe der Formel nach WEBSTER<sup>5</sup> (WEBSTER, 1958) optimiert. Innerhalb des Steuerungsverfahrens wurde als Zielfunktion die Minimierung der Gesamtverlustzeiten aller Ströme definiert. Zu beachten ist, dass GRADINESCU et al. (2007) als Eingangsgrößen reinen Pkw-Verkehr und eine Penetrationsrate von 100% an kommunikationsfähigen Fahrzeugen annehmen.

Für die Untersuchung wird ein selbst entwickelter kombinierter Verkehrsfluss-Kommunikationssimulator verwendet. In das Modell wurde zudem eine Methode zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasemission integriert (AKCELIK, BESLEY, 2003). In einem Vorher-Nachhervergleich des Verkehrsablaufs an den beiden betrachteten Knotenpunkten konnte, durch die Verwendung der V2I-Kommunikationsdaten anstelle stationärer Detektorik, eine Reduzierung der Gesamtverlustzeit um 28,3% sowie eine Verminderung des Kraftstoffverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen um jeweils ca. 6,5% festgestellt werden. Bei einer 100% Penetrationsrate und der damit verbundenen Möglichkeit anstelle der traditionellen, stationären Detektorik V2I-Kommunikationsdaten im Rahmen von Lichtsignalsteuerungen zu nutzen, erwarten GRADINESCU et al. neben den genannten positiven Effekten für den Verkehrsfluss auch eine signifikante Senkung der Betriebskosten für städtische Straßennetze.

Einen weit größeren Schritt in die Zukunft gehen Untersuchungen zum autonomen Fahren. Ausgestattet mit zahlreichen Sensoren und GPS-Modulen bewegen sich autonome Fahrzeuge vollkommen selbsttätig im Straßenraum. Erweiterte Möglichkeiten, um autonome Fahrzeuge sicherer und schneller insbesondere durch Konfliktflächen zu lenken, ergeben sich durch die Erweiterung der vorhandenen Sensorik mit Kommunikationsmodulen. Im Fokus steht hier die optimale Reihenfolge des Passierens einer Konfliktfläche von sich nähernden Fahrzeugen in konkurrierenden Strömen. Neben der Lenkung mittels direkter Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation beschäftigen sich zahlreiche theoretische Arbeiten bereits mit zukünftigen Steuerungsmethoden, die auf der Kommunikation zwischen Fahrzeug und einer lokalen Steuerungseinheit - ähnlich eines traditionellen Steuergeräts - basieren (KURT, PETER, 2006, WU, ABBAS-TURKI, CORREIA et al., 2007, ZHENG, WANG, NIHAN et al., 2006).

Ausgehend von einer 100% Ausstattungsrate senden sich nähernde autonome Fahrzeuge Informationen an eine lokale Steuerungseinheit. Anhand der abschätzbaren Ankunfts Muster wird nun innerhalb dieser Einheit festgelegt, welches Fahrzeug als erstes den Knotenpunkt passieren darf. Diese Information wird zusammen mit der weiteren Reihenfolge für das Passieren an alle Fahrzeuge innerhalb der Kommunikationsreichweite gesendet, wo sie entsprechend verarbeitet und umgesetzt werden. Für die Optimierung des Passierens wird die Methode der Dynamischen Programmierung verwendet (vgl. Abschnitt 4.3.2). Innerhalb der definierten Zielfunktion werden die Freigabezeitanteile optimiert. In den bisher betrachteten Szenarios zur

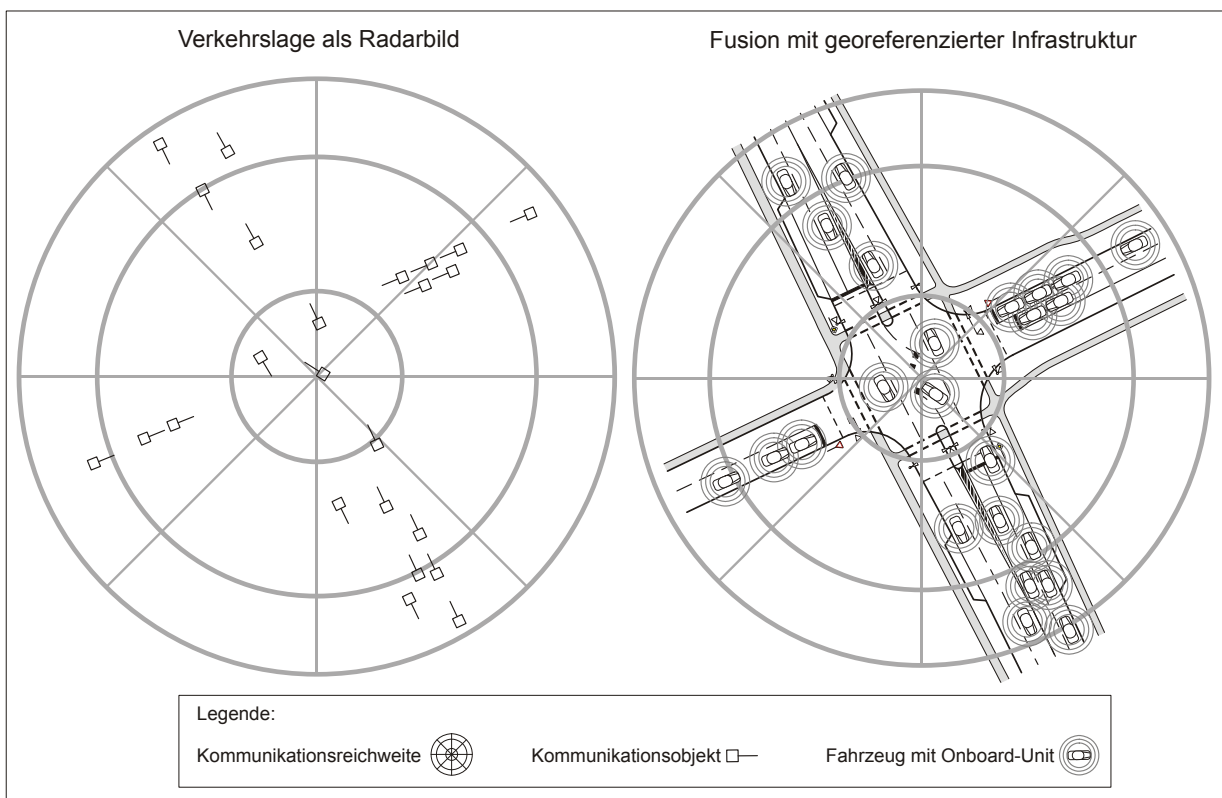
$$^5 t_U = \frac{1,5 \cdot T_Z + 5}{1 - \sum_{i=1}^p \frac{q_{\text{maßg},i}}{q_{Si}}}$$

mit  $t_U$ : optimale Umlaufzeit,  $T_Z$ : Summe der maßgebenden Zwischenzeiten,  $n$ : Anzahl der Phasen [-],  $q_{\text{maßg},i}$ : maßgebende Fahrstreifenverkehrsstärke der Phase  $i$  [Fz/h],  $q_{Si}$ : zugehörige Sättigungsverkehrsstärke für den maßgebenden Fahrstreifen der Phase  $i$  [Fz/h]

Lenkung autonomer Fahrzeuge im Bereich von Knotenpunkten werden allerdings keine Fußgänger und Radfahrer berücksichtigt. Die entsprechenden Zeitfenster zum Passieren des Knotenpunkts werden direkt in die Fahrzeuge übermittelt.

### 3.4 Nutzen von Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikationsdaten für Lichtsignalsteuerungen

Der wesentliche Vorteil der Nutzung von Fahrzeug-Lichtsignalanlage-Kommunikationsdaten gegenüber Daten lokaler Detektoren liegt zum einen in der frühzeitigen und kontinuierlichen Detektion von sich nähernden Fahrzeugen und zum anderen im übermittelten Informationsgehalt. So können neben der aktuellen Position des Fahrzeuges auch dessen Geschwindigkeit sowie die Route des Fahrzeuges (z.B. Informationen aus einem Navigationsgerät) bzw. dessen nächster Abbiegewunsch (z.B. Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers) übermittelt werden. Im idealen Fall einer Vollausstattung aller Fahrzeuge mit Kommunikationseinheiten kann so erstmals ein vollständiges zeitlich-räumliches Verkehrslagebild für einen Knotenpunkt „ermessen“ bzw. detektiert werden. Anstelle der Verwendung einer modellierten Verkehrslage (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) kann damit eine Optimierung der Lichtsignalsteuerung auf Basis realer (gemessener) Daten erfolgen. Abbildung 12 skizziert ein solches Verkehrslagebild in Anlehnung an ein Radarbild aus der Flugsicherung. Neben der zuverlässigen Prognose der Ankunftszeiten für jede Fahrbeziehung, sind eine direkte Erfassung der Rückstaulängen, der Fahrzeuge im Abfluss, etwaiger Störungen im Abfluss sowie ein Monitoring der Wartezeiten erstmalig möglich.



**Abbildung 12: Darstellung des Nutzens von Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikationsdaten bei hohen Ausstattungsraten in Form einer kontinuierlich detektierbaren Verkehrslage in Kombination mit georeferenzierter Infrastruktur.**

### 3.5 Erforderliche Penetrationsraten für ausgewählte Applikationen

Wesentlich beeinflusst wird die Güte und die Umsetzbarkeit von V2X-Applikationen von dem prozentualen Anteil an kommunikationsfähigen Fahrzeugen bezogen auf das Gesamtfahrzeugkollektiv, der so genannten Penetrationsrate (vgl. auch Abbildung 7). Eine Erhöhung der Verkehrssicherheit im Bereich einer Unfallstelle durch eine Warnmeldung via V2X-Kommunikationstechnologie kann nur dann erreicht werden, wenn zum einen möglichst viele Fahrzeuge die Meldung empfangen und ihre Fahrweise entsprechend anpassen können. Zum anderen sollten die Informationen möglichst großräumig übermittelt werden, damit der Fahrer frühzeitig auf die neue Situation reagieren kann. Im Rahmen des Forschungsprojektes FleetNet<sup>6</sup> wurde für die Anwendungsszenarios im Bereich der Verkehrssicherheit eine benötigte Penetration von mindestens 10% angenommen.

Multi-Hop Applikationen sind im Falle von geringen Penetrationsraten nur mit speziellen store-and-forward Übertragungsmethoden sinnvoll (WISCHHOF, EBNER, GANSEN, 2008). WISCHHOF, EBNER und GANSEN (2008) zeigen auf, dass in einem Autobahnszenario bei einer Durchdringungsrate von 10% und einer Kommunikationsreichweite von 500m eine Information im Broadcastmodus im Multi-Hop Verfahren nur durchschnittlich 1.500m weit kommuniziert werden kann. Die erforderlichen Penetrationsraten sind abhängig von der betrachteten Applikation (vgl. Tabelle 1). Für eine Einfädelungsassistenz auf Basis von V2V-Kommunikation (z.B. im Bereich von Autobahnbaustellen) wäre eine Vollausrüstung von 100% notwendig (MATHEUS, MORICH, PAULUS et al., 2005).

**Tabelle 1: Benötigte Penetrationsraten für ausgewählte Applikationen (MATHEUS, MORICH, PAULUS et al., 2005)**

Ausgewählte Applikationen	Benötigte Penetrationsrate
Dezentralisierte Floating Car Data	gering (~ 2%)
Lokale Gefahrenwarnung	mittel (~ 10%)
Kooperatives Fahren	hoch (~ 100%)

Im Zuge empirischer und simulativer Untersuchungen zur „Wolfsburger Welle“ (vgl. Abschnitt 3.3) konnten positive Effekte für den Verkehrsablauf ab einer Penetrations- und Akzeptanzrate von ca. 50% festgestellt werden (HOFFMANN, 1989). Im Rahmen der Forschungsinitiative ORINOKO quantifizierten WAGNER et al. (2008) anhand von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen die minimal notwendigen Penetrationsraten von Floating Cars (FC) für ausgewählte online bzw. offline operierenden Steuerungsstrategien in städtische Lichtsignalsteuerungen. Erste Untersuchungen an rein auf FC-Daten basierenden verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen mit einer trivialen Logik ermittelten eine notwendige Durchdringungsrate von >10% (WAGNER, BROCKFELD, EBENDT et al., 2008). Allerdings wird darauf hingewiesen, dass die Daten

<sup>6</sup> „FleetNet – Internet on the Road“ ist ein durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Forschungsprojekt zur Entwicklung und Standardisierung einer Kommunikationsplattform für ein Inter-Fahrzeug Ad-hoc-Funknetz (Laufzeit: 09/2000 bis 12/2003)

kritisch zu hinterfragen sind und die Ergebnisse bei anderen Szenarios stark variieren können. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei kommunikationsfähige Fahrzeuge an einem Knotenpunkt begegnen, analysierten BENMIMOUN, CHEN und SUZUKI 2007. Im Zuge der Entwicklung eines Kreuzungsassistenten, basierend auf V2V-Kommunikationstechnik, wurde aufgezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der sich zwei kommunikationsfähige Fahrzeuge an einer Kreuzung begegnen, sich quadratisch proportional zur Penetrationsrate verhält. Bei einem Ausrüstungsgrad von 20% ergibt sich dementsprechend eine Begegnungswahrscheinlichkeit von nur 4%. Die in Kapitel 3.3 beschriebene Untersuchung von GRADINESCU et al. (2007) zeigt, welcher positive, verkehrliche Nutzen für den innerstädtischen Verkehr durch die Einbindung von V2X-Kommunikationsdaten in adaptive Steuerungsverfahren bei einer Vollausstattung (Penetrationsrate 100%) zu erwarten ist. Welchen Zeitraum es benötigt, eine gewisse Marktdurchdringung mit einer Fahrzeuginnovation zu erzielen, wird im Folgenden skizziert.

Gemäß Krafftfahrtbundesamt betrug die Anzahl der in 2007 zugelassenen Kraftfahrzeuge insgesamt etwa 49 Millionen (Stand: 01.01.2008). Eine Penetration von 10% würde dementsprechend einer Anzahl von ca. 4,9 Millionen Fahrzeugen entsprechen. Die Anzahl an neuzugelassenen Fahrzeugen in 2007 betrug 3,7 Millionen Pkw und 275.000 Lkw. Würden alle neuzugelassenen Fahrzeuge mit der zukünftigen Kommunikationstechnik ausgerüstet sein, so würde eine Penetrationsrate von 10% in ca. 1,5 Jahren erreicht werden können (vgl. Abbildung 13). Dies würde jedoch nur bei einer gesetzlichen Einführung und entsprechenden Verpflichtung des Einbaus der Kommunikationstechnik in Neufahrzeuge (z.B. im Rahmen einer Pkw-Maut) eine realistische Annahme sein, die allerdings nicht zu erwarten ist. MATHEUS, MORICH und LÜBKE (2004) halten vor diesem Hintergrund eine Penetration innerhalb aller Neufahrzeuge in Deutschland von höchstens 50% für realistisch. Dies würde einer Ausrüstung aller Neufahrzeuge der Volkswagen AG, BMW AG und der damaligen DaimlerChrysler AG bzw. aller Mittel- und Oberklassefahrzeuge entsprechen. Eine Penetrationsrate von 10% bezogen auf das Gesamtfahrzeugkollektiv könnte gemäß Abbildung 13 dann in ungefähr 3 Jahren erreicht werden. Der dargestellte Mindestausrüstungsgrad („functional limit“) von 10% bezieht sich auf Applikationen im Bereich der lokalen Gefahrenwarnung (vgl. Tabelle 1).

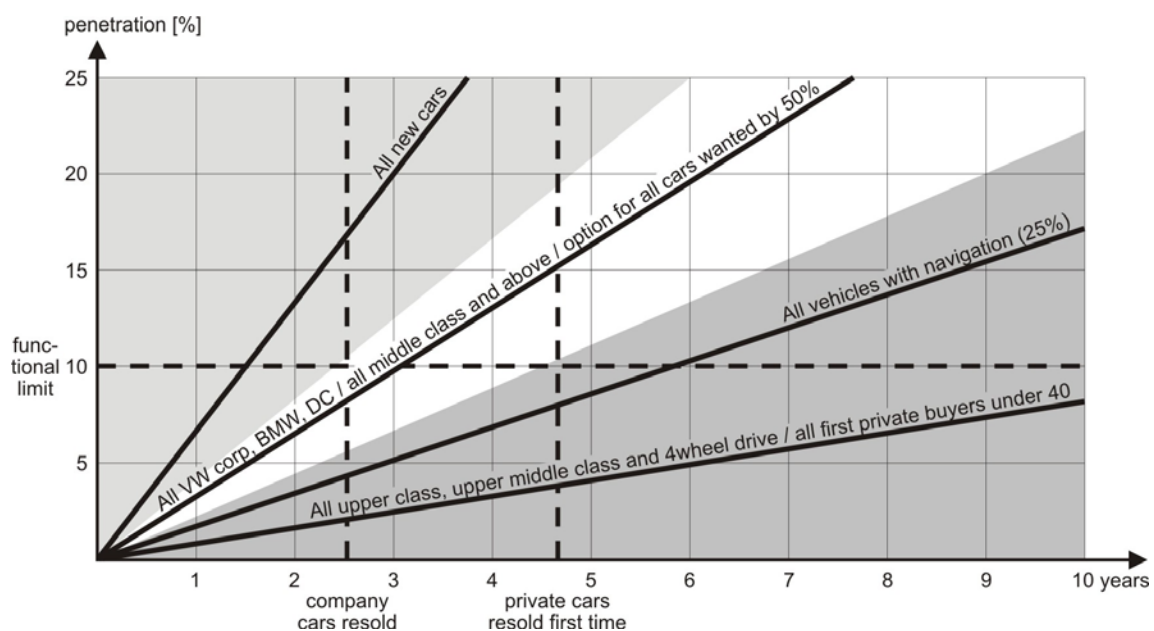


Abbildung 13: Prognose der Fahrzeugdurchdringung (MATHEUS, MORICH, LÜBKE, 2004)

### 3.6 Positionierungsverfahren

Eine grundlegende Voraussetzung für die beschriebenen Applikationen ist die nahezu exakte Bestimmung der Positionen der Kommunikationspartner (Fahrzeuge, Infrastruktur). Die Mehrheit der derzeitigen Systeme zur automatischen Positionsbestimmung von Fahrzeugen, basiert auf der Global Positioning System (GPS) Technologie. Das ursprünglich für militärische Zwecke entwickelte Positionierungs- und Zeitmessverfahren des amerikanischen Verteidigungsministeriums, steht seit 1984 kostenfrei für zivile Nutzungen zur Verfügung. Das System setzt sich aus drei Basiskomponenten zusammen (vgl. Abbildung 14 (links)):

- Space-Segment: 21 aktive Satelliten und drei Reservesatelliten in einer Höhe von 20.180km (GPS-Satelliten),
- Control-Segment: bestehend aus fünf Kontrollstationen und einer Hauptstation,
- User-Segment: militärische bzw. ziviler Nutzer (GPS-Empfänger).

Zur Positionsbestimmung wird die Laufzeit zwischen mindestens vier Satelliten und einem im Fahrzeug befindlichen GPS-Empfänger verwendet. „Mit Hilfe einer Borduhr im GPS-Empfänger und den von den Satelliten mit Lichtgeschwindigkeit empfangenen Zeit- und Positionsdaten kann im Fahrzeug die Entfernung zwischen Nutzerstandort und jedem Satelliten durch Signallaufzeitdifferenzrechnung ermittelt werden.“ (HUBER, 2001). Die möglichen Positionen des Empfängers (in diesem Falle des Fahrzeugs) auf der Erde beschreiben eine Kreisfläche auf der Erde. Durch Bestimmung des Schnittpunktes der drei resultierenden Kreisflächen auf der Erde kann die Position des Empfängers bestimmt werden. Die Einbeziehung eines vierten Satelliten berücksichtigt eine suboptimale Synchronisation der Uhren in den Satelliten und des GPS-Empfängers. Mit dem beschriebenen System können Genauigkeiten von bis zu 15m im zivilen Bereich erreicht werden.

Insbesondere in städtischen Straßennetzen ist eine maximale Genauigkeit von 15m für einige der genannten Applikationen nicht ausreichend. Aufgrund topologischer und morphologischer Gegebenheiten sind zudem zusätzliche Fehlerquellen zu berücksichtigen. Eine Fehlbestimmung der Laufzeit von nur einer Millisekunde führt bereits zu einem Fehler von 30m (HUBER, 2001). Eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit der Positionsbestimmung kann mit Hilfe verschiedener Korrekturmethode erzielt werden. Im Folgenden werden die Methoden Map Matching und Differential GPS (DGPS) näher betrachtet.

Eine Verbesserung der GPS-Positionsdaten wird im Rahmen von Map Matching Verfahren durch die Einbindung von digitalen georeferenzierten Karten erzielt wie sie in Fahrzeug-Navigationssystemen verwendet werden. Das Verfahren vergleicht die empfangenen aktuellen GPS-Positionsdaten mit den Informationen der digitalen Karte und ermittelt auf Basis dessen und der relativen Fahrzeugbewegung die wahrscheinlichste Position des Fahrzeugs in der digitalen Karte. Der hierzu verwendete Navigationsrechner kann so überprüfen, ob sich das Fahrzeug noch auf einem Streckenabschnitt befindet und ggf. eine Ortskorrektur vornehmen. Maßgeblich beeinflusst wird die Güte der Genauigkeit bei diesem Verfahren jedoch von der Güte der verwendeten digitalen Karten.

Das DGPS-System basiert auf einer Relativfehlerermittlung. Dabei wird als zusätzliches Systemelement eine wetterfeste, eingemessene Referenzstation genutzt, die das GPS-Satellitensignal empfängt. Die Positionsdaten der stationären Referenzstation sind dabei mit

sehr hoher Genauigkeit bekannt. Die von den GPS-Satelliten empfangenen Positionsdaten können nun mit den tatsächlichen Positionsdaten der Referenzstation verglichen werden und für jede Satellitenkonstellation ein Korrekturwert ermittelt werden. Dieser Korrekturwert wird z.B. über einen Funkkanal mehreren mobilen GPS-Empfängern (z.B. in Fahrzeugen) zur Verfügung gestellt mit dem die Satellitensignale der mobilen Nutzer wiederum korrigiert werden (vgl. Abbildung 14 (rechts)).

Eine Voraussetzung für die Verwendung von DGPS-Systemen ist ein entsprechender Empfänger im Fahrzeug, der die GPS-Satellitensignale und die bereitgestellten Korrekturwerte der Referenzstation entschlüsselt. In Abhängigkeit der Qualität des DGPS-Empfängers können Genauigkeiten von bis zu 0,3m erzielt werden. Kostengünstige DGPS-Systeme erreichen bereits eine Genauigkeit von 2-3m (DU, BARTH, 2008).

Basierend auf einem fahrzeugseitigen DGPS-System und einer digitalen Straßenkarte entwickelten DU und BARTH (2008) eine Methode zur Bestimmung des aktuellen Fahrstreifens. Bei einer Analyse von mehr als 100.000 (Fahr-)Sekunden konnte in 97% der Fälle eine richtige Fahrstreifenzuordnung erzielt werden.

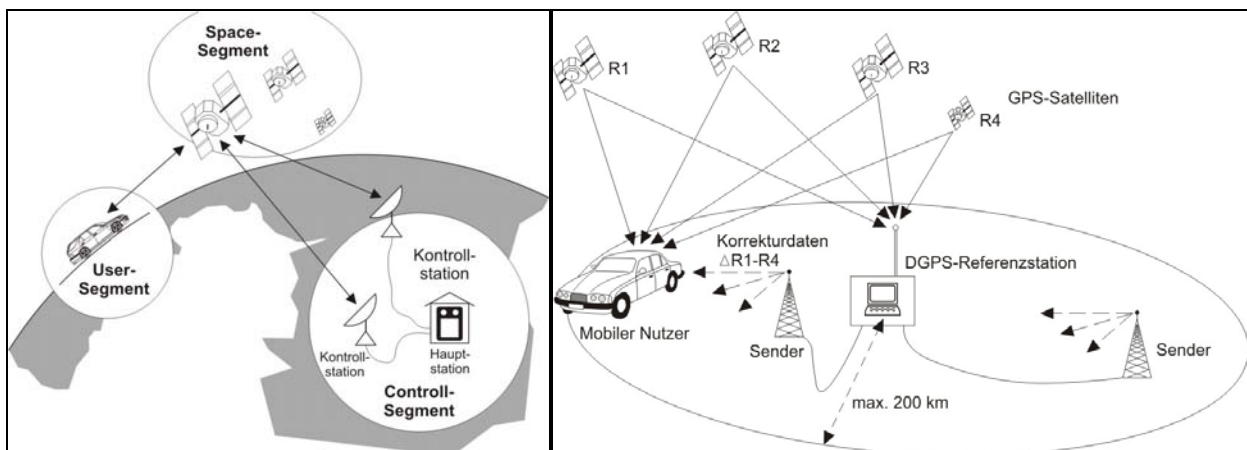


Abbildung 14: Komponenten des GPS-Systems (FÖLLING, 1994) (links); Komponenten des DGPS-Verfahrens (HUBER, 2001) (rechts)

## 4 Optimierungsverfahren

### 4.1 Allgemeines

Im Sinne der Mathematik bezeichnet der Begriff der Optimierung die Bestimmung der optimal zulässigen Lösungen eines Entscheidungsproblems hinsichtlich einer spezifischen Zielsetzung. Dabei ist die Anzahl an Entscheidungen bzw. Lösungen in der Regel durch Nebenbedingungen begrenzt. Die Summe aller möglichen Entscheidungen eines Problems wird als Lösungsraum bezeichnet.

Die spezifische Zielsetzung, nach der eine optimale Entscheidung gefunden werden soll, wird durch eine mathematische Funktion, der so genannten Zielfunktion  $f$ , beschrieben. In Abhängigkeit der Zielsetzung gilt diejenige Lösung  $x$  eines Optimierungsproblems als optimal, die den Zielfunktionswert  $f(x)$  minimiert bzw. maximiert. Die optimale Lösung ist demnach diejenige Lösung unter allen zulässigen Lösungen, die sicherstellt, dass es in einer Umgebung keinen kleineren bzw. größeren Zielfunktionswert gibt.

Bezogen auf das Problem der Lichtsignalsteuerung sind häufig benutzte verkehrliche Kenngrößen innerhalb der Zielfunktion  $f(x)$ :

- Minimierung der Anzahl an Halten,
- Minimierung der Wartezeiten,
- Minimierung der Emissionen,
- Minimierung der Rückstaulängen und
- Maximierung der Reisegeschwindigkeit.

Die Größe des Lösungsraums ergibt sich aus der Summe der zulässigen Lösungen über den betrachteten zeitlichen Horizont unter Beachtung der Nebenbedingungen. FRIEDRICH (1999) zeigt anschaulich anhand eines vereinfachten Beispiels einer Knotenpunktsteuerung mit zwei Phasen A und B ohne Nebenbedingungen die unterschiedlichen Lösungswege für einen Zeithorizont von 100s. Hier wird angenommen, dass die Summe aus minimaler Freigabezeit und Phasenübergangsdauer je Phase einheitlich 10s beträgt. Abbildung 15 zeigt alle zulässigen Phasenkombinationen als Wege  $n$  innerhalb eines Gitternetzes. Exemplarisch ist hier eine mögliche Phasenkombination hervorgehoben.

Die Summe der möglichen Lösungswege  $L$  ergibt sich für einen Zeithorizont von  $n$  Schritten aus der Summe der Koeffizienten des „Pascalschen Dreiecks“ zu (FRIEDRICH, 1999):

$$L = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = 2^n \quad (1)$$

Für das gezeigte Beispiel ergibt sich somit ein Lösungsraum von 1.024 zulässigen Lösungen. Dieses Beispiel zeigt sehr anschaulich, dass bereits bei einfachen Optimierungsproblemen der Lösungsraum stark anwächst. Bei einer Knotenpunktsteuerung mit drei Phasen ergeben sich bereits 59.049 zulässige Lösungen.

Mit der Größe des Lösungsraums wachsen auch die benötigte Rechenleistung und –zeit an, um die optimale Lösung zu finden. BRAUN nimmt für die Berechnung einer möglichen Lösung eine Rechenzeit von 0,01s mit heutigen Rechnern an (BRAUN, 2008). Für das oben genannte Beispiel einer 3-Phasensteuerung würde sich demnach eine Rechenzeit zur Berechnung aller Lösungen von ca. 10min ergeben.

Im Rahmen von Knotenpunktsteuerungen sind allerdings zeitnahe Entscheidungen zu treffen. Vor diesem Hintergrund werden innerhalb von Netzsteuerungen Optimierungsverfahren verwendet, die in kurzer Rechenzeit die optimale Lösung finden bzw. annähern können.

Im Folgenden werden Optimierungsverfahren unterschieden nach:

- Heuristische Verfahren bzw. mathematische Näherungsverfahren,
- exakte mathematische Verfahren.

Ausgewählte Optimierungsverfahren aus jeder Kategorie werden nachfolgend näher vorgestellt. Die Auswahl beschränkt sich dabei auf Methoden, die in Steuerungsverfahren bereits erfolgreich eingesetzt werden.

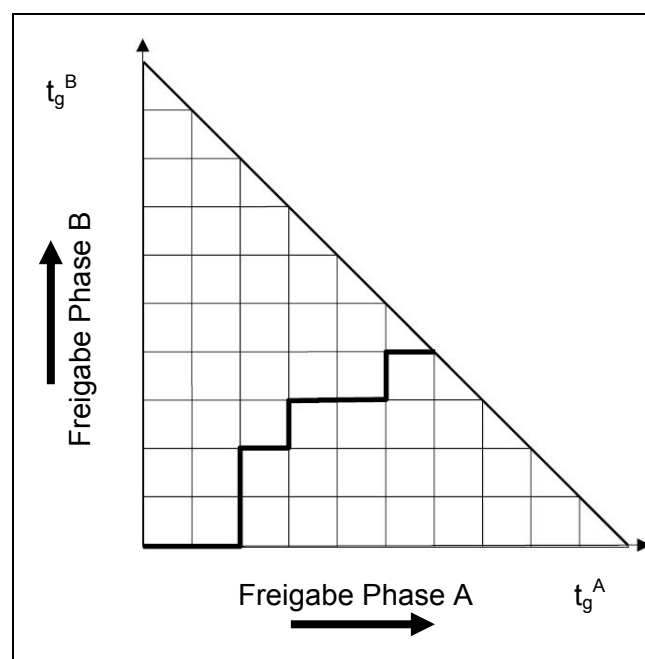


Abbildung 15: Lösungsraum einer zweidimensionalen Entscheidungsproblems ohne Nebenbedingungen bei einem Zeithorizont von 10 Schritten bzw. 100s (FRIEDRICH, 1999).



## 4.2 Heuristiken

Als Heuristik (altgriechisch: heurisko = „ich finde“) werden in der Optimierung nicht-exakte Methoden für Entscheidungsprobleme bezeichnet. Innerhalb von heuristischen Verfahren wird der potentielle Lösungsraum anhand von Expertenwissen sowie Annahmen und Regeln aus weiteren Lösungsverfahren reduziert. Auf diese Weise kann die Größe und Komplexität des Lösungsraums verringert werden durch (MERTZ, 2001):

- das Lenken der Durchsuchungsrichtung des Lösungsraums,
- das Eingrenzen des Lösungsraums im Vorhinein oder
- das Aufbrechen des globalen Problems in kleinere Teilprobleme.

Wesentlicher Vorteil dieser Vereinfachungen ist die daraus resultierende verkürzte Rechenzeit bei der Suche der optimalen Lösung gegenüber exakten mathematischen Verfahren. Damit besteht die Möglichkeit Entscheidungsprobleme zu lösen, die für exakte Optimierungsmethoden zu komplex sind.

Das Finden der global optimalen Lösung kann allerdings mit heuristischen Verfahren nicht sichergestellt werden.

### 4.2.1 Hill-Climbing Algorithmus

Der Hill-Climbing Algorithmus gehört zu den deterministischen Optimierungsverfahren. Hier wird der Graph der Zielfunktion  $f(x)$  über den Zeithorizont von  $n$ -Schritten als Berg- und Taland-schaft interpretiert. Die einzelnen lokalen Minima und Maxima der Zielfunktion bilden kleinere Täler und Anhöhen. In Abhängigkeit der definierten Zielfunktion wird nun von einem zufällig gewählten Startpunkt aus mit einer definierten Schrittweite der Berg bergauf bzw. bergab „geklettert“. Nach jedem Schritt (z.B. Veränderung der Versatzzeit) wird die neue Lösung bewertet. Im Falle eines verbesserten Zielfunktionswertes gegenüber der alten Lösung, wird die neue Lösung angenommen und der nächste Schritt vorgenommen. Entfernt sich die neue Lösung weiter von der definierten Zielfunktion als die letzte Lösung, wird der Algorithmus abgebrochen. Die letzte gefundene Lösung wird dann als optimale Lösung angenommen.

Die Gefahr bei der Anwendung des Hill-Climbing Verfahrens ist offensichtlich: *„Ist die Zielfunktion nicht konvex, d.h. existieren im Funktionsgebirge lokale Optima [...] so kann sich das Verfahren leicht darin verfangen und hat dann keine Möglichkeit mehr, das globale Optimum zu finden, weil durch lokale Veränderungen der Variablen nur noch Verschlechterungen der Zielfunktion auftreten“* (MERTZ, 2001).

Die Vorteile dieses Näherungsverfahrens liegen in der sehr schnellen Suche nach einer vermeintlich besten Lösung, wie sie im Bereich der Lichtsignalsteuerung zwingend notwendig ist. Zudem konvergiert das Verfahren immer. In der Regel wird daher der Hill-Climbing Algorithmus für die Lösung von Funktionen verwendet, wenn ein exaktes Lösungsverfahren zu rechenintensiv ist. Einsatz findet der Algorithmus z.B. in der adaptiven Netzsteuerung BALANCE (FRIEDRICH, 1999) und im Rahmen der Versatzzeitenoptimierung bei SCOOT (HUNT, ROBERTSON, BRETHERTON, 1981) und TRANSYT-7F (ROBERTSON, 1969) (vgl. Abschnitt 2.3).

### 4.2.2 Genetischer Algorithmus

Auf Basis der Evolutionstheorie nach DARWIN (1858) versuchen genetische Algorithmen den Evolutionsprozess der Natur nachzubilden. Nach dem Prinzip „Survival of the Fittest“ werden nur diejenigen Arten natürlich selektiert und dürfen sich weiterentwickeln, die sich am besten an ihre sich verändernde Umgebung anpassen können, während schlecht angepasste Arten aussterben.

Folgende Prozesse werden innerhalb des Genetischen Algorithmus vollzogen:

- Initialisierung: Erzeugung einer bestimmten Menge (Population) an Lösungsansätzen (Individuen), die den Lösungsraum darstellen. Jede Lösung innerhalb des Lösungsraums wird auch als Genom bezeichnet, das entsprechende n-Tupel setzt sich aus verschiedenen Chromosomen zusammen.
- Evaluation: Für jedes Individuum wird anhand der definierten Zielfunktion ein Zielfunktionswert (Fitness) bestimmt.
- Selektion: In Abhängigkeit der Fitness wird eine Anzahl von Individuen ausgewählt. Je höher die Fitness des Individuums, desto größer die Wahrscheinlichkeit der Selektion („Survival of the Fittest“).
- Rekombination: Innerhalb eines Optimierungsschrittes werden Genome verschiedener Individuen neu kombiniert und so eine neue Generation erzeugt.
- Mutation: Zufällige Veränderung der Fitness einzelner Individuen.

Weitere Prozesse innerhalb eines Genetischen Algorithmus können sein: Migration, Lokalität, Nachbarschaft, Parallelität oder Konkurrenz (BRAUN, 2008). Die angenäherte optimale Lösung entwickelt sich gemäß der Evolutionstheorie nach zahlreichen Iterationen und entsprechenden Selektionen der besten Lösungen. Es wird schließlich diejenige Lösung als optimal angenommen, die nach einem definierten Abbruchkriterium für die Iterationen die beste Annäherung an die Zielfunktion darstellt.

Vorteile des Algorithmus sind seine vielfältige Anwendbarkeit und seine Robustheit gegenüber sich ändernden Rahmenbedingungen. Zudem können alle zu optimierenden Parameter gleichzeitig optimiert werden und schnell sehr große unregelmäßige Lösungsräume durchsucht werden (BRAUN, 2008). Kritisch sieht MERZ (2001) hingegen die Qualität der gefundenen Lösungen und die nicht triviale Berücksichtigung von Nebenbedingungen.

In der Praxis wird der Algorithmus primär in offline-Verfahren zur Netzsteuerung erfolgreich eingesetzt. So beispielsweise in der US-Version von TRANSYT-7F (HALE, 2005). Hier kann optional anstelle des bereits vorgestellten Hill-Climbing Algorithmus ein Genetischer Algorithmus zur Optimierung der Umlauf-, Freigabe- und Versatzzeiten verwendet werden. Beispiele für die Verwendung von genetischen Algorithmen im Rahmen von online Verfahren sind MOTION (BUSCH, KRUSE, 1993) und GALOP (BRAUN, 2008).

## 4.3 Exakte mathematische Verfahren

### 4.3.1 Vollständige Enumeration

Die Methode der vollständigen Enumeration ist die in ihrer Struktur einfachste Methode zur Lösung der meisten Optimierungsprobleme (MÜLLER-MERBACH, 1973). Diese Optimierungsmethode besteht in der vollständigen Berechnung aller zulässigen Lösungen des Lösungsraums und der Auswahl der besten Lösung.

Die Anwendung der vollständigen Enumeration ist somit abhängig von der Größe des Lösungsraums. Bei Entscheidungsproblemen mit einer großen Zahl an Lösungsmöglichkeiten würde eine vollständige Enumeration des Lösungsraums zu hohen Rechenleistungen und –dauern führen, da die erforderliche Rechenzeit mit der Größe des Lösungsraums exponentiell ansteigt. Kleine Lösungsräume lassen sich dagegen in kurzer Zeit problemlos vollständig enumerieren. Innerhalb von online Steuerungsverfahren muss wegen der begrenzten Rechenzeit das Ergebnis in wenigen Schritten ermittelt werden können (FRIEDRICH, 1999).

### 4.3.2 Dynamische Programmierung

Der Begriff der Dynamischen Programmierung wurde erstmals um 1949 vom amerikanischen Mathematiker Richard Bellman benannt (BELLMAN, 1952, DREYFUS, 2002). Diese Optimierungsmethode baut auf der parallelorganisierten stufenweisen Enumeration auf. Dabei werden diejenigen Teillösungen oder Teilfolgen gelöscht, die eindeutig nicht zu einer besseren Lösung führen werden als eine bereits betrachtete Teilfolge (MÜLLER-MERBACH, 1973).

Die Dynamische Programmierung ist eine rekursiv operierende mathematische Optimierungsmethode zur Lösung mehrstufiger kombinatorischer Probleme, bei denen der Übergang von jedem Zustand einer Stufe zur nächst-höheren Stufe mit Hilfe einer beschränkten Anzahl an alternativen Entscheidungen erfolgt. Jeder Stufenübergang und die damit verbundene Entscheidung impliziert Kosten, z.B. Zeitaufwand, Kraftstoffverbrauch, monetäre Kosten etc.. Der Begriff der „Programmierung“ bzw. der „linearen Programmierung“ bezeichnet dabei eine tabellarische Protokollierungstechnik von Teillösungen. Das eigentliche Entscheidungsproblem liegt nun darin, einen Weg mit minimalen Kosten zu finden, der von einer Anfangsstufe ausgehend eine Endstufe erreicht (PAPAGEORGIOU, 1991).

Die Dynamische Programmierung ist kein Algorithmus im klassischen Sinn, sondern vielmehr ein Konstruktionsprinzip für Optimierungsverfahren zur Lösung von in der Zeit ablaufender Prozesse (MERTZ, 2001). Die Lösungen der einzelnen Zeitstufen beeinflussen dabei die Ausgangslage der folgenden Zeitstufen (KELLER, BOESEFELDT, GARBEN et al., 1982).

Folgende Charakteristika sind Voraussetzung für die Anwendung:

- Das Problem muss rekursiv beschreibbar sein.
- Das Problem muss dem Optimalitätsprinzip genügen, d.h. dass sich die optimale Lösung des Entscheidungsproblems aus den optimalen Lösungen der Teilprobleme ergibt.
- Das Problem benötigt mehrfach gleiche Teillösungen.

Zum Einsatz kommt diese Methode häufig bei Problemstellungen, die sich auf die Suche von einem Minimum oder Maximum erzielenden Kombination beziehen, wie z.B. Problem eines Handlungsreisenden, Knapsackproblematik. Die Methode ermittelt nicht eine Lösung, sondern filtert die beste Lösung aus allen vorhandenen heraus. Der Algorithmus sieht die Unterteilung des Gesamtproblems in mehreren Ebenen von gleichartigen Teilproblemen vor. Zuerst werden die Teilprobleme der untersten Ebene gelöst und dessen Ergebnis auch für gleichwertige Teilprobleme gespeichert („programmiert“). Dieses Ergebnis fließt in der nächst höheren Ebene mit weiteren Lösungen anderer Teilprobleme der untersten Stufe zusammen. Wiederum wird die beste Lösung aus diesen ermittelt und als Ergebnis an die nächst höhere Ebene weitergegeben. Der Vorgang ist abgeschlossen, wenn die höchste Ebene erreicht ist. Das Konstrukt, das sich daraus ergibt, lässt sich als Such- bzw. Entscheidungsbaum beschreiben.

#### 4.4 Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen basierend auf den Methoden der Vollständigen Enumeration und Dynamischen Programmierung

Im Abschnitt 2.3 wurden bereits etablierte Netzsteuerungsverfahren vorgestellt, welche die heuristischen Optimierungsverfahren Hill-Climbing Algorithmus und Genetischen Algorithmen nutzen, um den innerstädtischen Verkehrsfluss zu verbessern. Die Methoden der Vollständigen Enumeration und Dynamischen Programmierung werden hingegen vorrangig für die Optimierung von Knotenpunktsteuerungen verwendet, die im Folgenden vorgestellt werden.

Eines der ersten Konzepte für die Optimierung von offline Signalplänen für Lichtsignalanlagen auf Basis der Methode der Dynamischen Programmierung stellten ROBERTSON und BRETHERTON mit dem Verfahren **DYPIC** 1974 vor. Als Untersuchungsraum diente ein einzelner Knotenpunkt mit zwei Zufahrten bzw. konkurrierenden Strömen A und B. Wesentliche Voraussetzung für die Anwendung dieses dezentralen Steuerungskonzepts ist die Kenntnis der Ankunftsrate aller Ströme für einige Minuten in der Zukunft, womit DYPIC als Online-Verfahren ausscheidet. Obwohl diese Annahme von ROBERTSON und BRETHERTON (1974) als nicht sehr realistisch eingeschätzt wurde, soll deren Pionierarbeit an dieser Stelle genauer betrachtet werden. Das Ziel von DYPIC ist es, für einen definierten Zeitraum von mehreren Minuten, diejenige Phasenfolgen und -dauern zu finden, die zu einer minimalen Verlustzeit am Gesamtknotenpunkt führen. Dieses Entscheidungsproblem wird gemäß dem Optimalitätsprinzip der Methode der Dynamischen Programmierung in Teilprobleme kürzerer Dauer  $\Delta t$  von je 5s untergliedert. Die Zielfunktion jedes Teilproblems beinhaltet die Minimierung der Gesamtverlustzeit am Knotenpunkt je Zeitintervall  $\Delta t$ . Aufgrund der definierten Grundvoraussetzung (bekannte Ankunftsrate), kann zu jedem Zeitintervall  $\Delta t$  die Anzahl an wartenden und sich bewegendes Fahrzeugen in den beiden Zufahrten A und B bestimmt werden. Die zu minimierende Verlustzeit  $D$  ergibt sich zu:

$$D = \frac{0.2}{(1-Y)} (Q_G + 1.3Q_R)^2 \quad \text{mit} \quad Y = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Ankunftsrate}}{\text{Sättigungsverkehrsstärke}} \quad (2)$$

Mit:	D	=	Gesamtverlustzeit am Knotenpunkt [Fz-s]
	$Q_G$	=	Anfangsstaulänge in der Zufahrt mit Freigabe [Fz]
	$Q_R$	=	Anfangsstaulänge in der Zufahrt mit Sperrzeit [Fz]
	i	=	Zufahrten am Knotenpunkt [-]

Die grundlegende Idee von ROBERTSON und BRETHERTON besteht darin, dass die optimale Steuerung nach einem Zeitpunkt  $t$  von dem augenblicklichen Zustand (Fahrzeuge in den Zufahrten A und B) zum Zeitpunkt  $t$  und den zukünftigen (bekannten) Ankunftsdaten abhängt, nicht jedoch von vorherigen Phasenwechseln. Auf Basis dieser Annahme wurde ein rückläufig operierendes Verfahren entwickelt, welches ausgehend vom Endzustand  $T$  schrittweise die Teilprobleme  $(t-1)$  löst, um abschließend den Ausgangszustand  $t=0$  zu erreichen. Endergebnis ist die optimale Phasenfolge und -dauer für den betrachteten Zeitraum  $T$ .

Abbildung 16 zeigt das Prinzip der Methode DYPIC. Ausgehend von einem beliebigen Zustand zum Zeitpunkt  $(t-1)$  wird anhand der Anzahl bereits wartender Fahrzeuge ( $F_z$ ) in den Strömen A (2) und B (1), der Anzahl zukünftig ankommender Fahrzeuge (in  $A=1$ , in  $B=2$ ) und der einheitlichen Service rate von  $2F_z$  je  $\Delta t$  überprüft, ob es für die Erfüllung der Zielfunktion sinnvoller ist die Phase zu wechseln oder beizubehalten. Der entsprechende Wert der Verlustzeit für die gewählte Entscheidung zum Zeitpunkt  $(t-1)$  wird nun in das entsprechende Feld zum Zeitpunkt  $t$  übertragen. Äquivalentes Vorgehen erfolgt für alle weiteren Kombinationen der dargestellten Matrix und alle weiteren Zeitstufen. Simulationsuntersuchungen zeigten, dass im Vergleich zu einer Festzeitsteuerung die Verlustzeiten mit DYPIC um bis zu 50% reduziert werden konnten. Auch gegenüber einer traditionellen verkehrsabhängigen Steuerung konnte DYPIC die Verlustzeiten signifikant reduzieren.

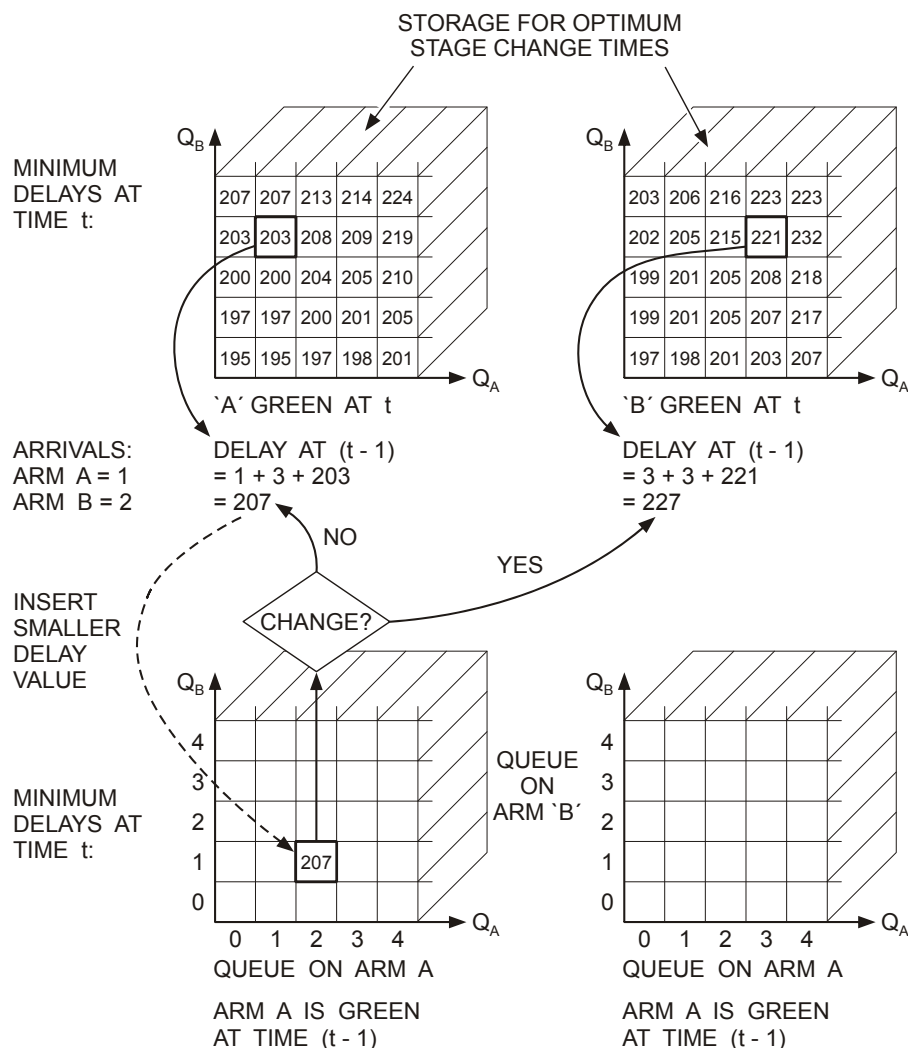


Abbildung 16: Prinzip des Verfahrens DYPIC (ROBERTSON, BRETHERTON, 1974)

**OPAC** (**O**ptimization **P**olicies for **A**daptive **C**ontrol) (GARTNER, 1982, GARTNER, 2002) ist ein dezentrales online basiertes Netzsteuerungsverfahren, welches hierarchisch in drei Stufen aufgebaut ist. Innerhalb der untersten Ebene erfolgt lokal die Optimierung jeder einzelnen Knotenpunktsteuerung separat im Netz. Dabei werden jeweils einzelne Optimierungshorizonte betrachtet, deren Länge einer Umlaufzeit entsprechen, die auf den höheren Systemebenen generiert wird. Auf der zweiten Ebene, der so genannten Koordinierungsebene, erfolgt die Optimierung der Versatzzeiten benachbarter Knotenpunkte in engen Rahmen von  $\pm 2$ s je Optimierung. Für einen Horizont von mehreren Minuten werden auf der obersten Ebene netzweite Umlaufzeiten generiert und an die unteren Ebenen übermittelt.

Innerhalb des Optimierungshorizonts in der lokalen Ebene wird die (Umlauf-) Zeit in Intervalle von 2-5s diskretisiert. Mit Hilfe der Methode der Dynamischen Programmierung werden innerhalb des Optimierungshorizonts die einzelnen Phasendauern und -wechsel in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrslage für die betrachtete Umlaufzeit festgelegt. Der Lösungsraum wird dabei vollständig enumeriert (LÄMMER, 2007). In OPAC sind zudem obere und untere Grenzen für die Freigabezeiten definiert. Im Rahmen der zu minimierenden Zielfunktion wird ein Performance Index PI definiert. Parameter innerhalb von PI sind die Gesamtverlustzeit sowie die Anzahl an Halten am Knotenpunkt.

Die dafür notwendige Erfassung der Verkehrsnachfrage erfolgt anhand von Detektoren, die sich jeweils an den Ausfahrten der benachbarten Knotenpunkte bzw. am Beginn der Zufahrten befinden. Mit Hilfe der Methode des rolling horizon und der Annahme konstanter Geschwindigkeiten werden die lokal erhobenen Verkehrsstärken sukzessive für die gesamte Zufahrt propagiert.

Sowohl in Simulationen als auch in realen Testfeldern konnte OPAC die Verlustzeit gegenüber bestehenden verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen um 5-10% reduzieren. Insbesondere bei hohen Sättigungsgraden zeigte OPAC eine hohe Leistungsfähigkeit.

**PRODYN** (**D**ynamic **P**rogramming) ist ein dezentrales Online-Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzen (HENRY, FAGRGES, TUFFAL, 1983). Dabei werden innerhalb von PRODYN keine traditionellen Kenngrößen einer Lichtsignalsteuerung wie Versatzzeiten, Freigabezeiten oder Umlaufzeiten definiert, sondern es wird innerhalb des Verfahrens azyklisch anhand der aktuellen Verkehrslage entschieden, ob eine Phase gewechselt werden soll. Die globale Zeit ist dabei in Zeitintervalle von je 5s diskretisiert. Innerhalb der Zielfunktion ist die Minimierung der Gesamtverlustzeit im Netz definiert.

Analog zu OPAC nutzt PRODYN den Ansatz des rolling horizon, enumeriert allerdings nicht vollständig den Lösungsraum sondern nutzt das heuristische Verfahren der Forward Dynamic Programming (LÄMMER, 2007). PRODYN ist hierarchisch in zwei Ebenen aufgebaut. Innerhalb der übergeordneten Ebene erfolgt die Koordinierung von Knotenpunkten im Netz, während auf den unteren Ebenen die jeweilige Optimierung der lokalen Steuerung erfolgt. Die erforderlichen Daten zur Verkehrslage werden anhand von Detektoren erhoben. Dabei benötigt das Verfahren einen Detektor zu Beginn jeder Zufahrt und einen weiteren ca. 50m vor der Haltlinie. Die Koordinierung von benachbarten Knotenpunkten erfolgt über den Austausch der aktuellen und prognostizierten Rückstaus über die übergeordnete Ebene (HENRY, 1989). Innerhalb von umfangreichen Feldtests auf dem ZELT-Testgelände in Toulouse konnte PRODYN in einem Netz mit

sieben signalisierten Knotenpunkten eine Reduzierung der Reisezeit von ca. 10% gegenüber einer optimierten Festzeitsteuerung erzielen.

FANG und ELEFTERIADOU (2006) präsentieren eine Methode zur Optimierung der Steuerung von zwei Lichtsignalanlagen an einem teilplanfreien Knotenpunkt (System: Raute) innerhalb einer Anschlussstelle eines Highways in den USA. Wesentliche Besonderheit des Untersuchungsraums ist der geringe Abstand der beiden Anlagen (122m) und der damit verbundene reduzierte Aufstellbereich für Fahrzeuge. Aufgrund der überwiegend geringen Knotenpunktabstände in städtischen Straßennetzen lässt sich die entwickelte Methodik sehr gut auf urbane Straßennetze übertragen (FANG, ELEFTERIADOU, 2006). Für die Optimierung der Phasendauer und -folge wird die Methode der Forward Dynamic Programming verwendet. Die erforderliche Abschätzung der Verkehrsnachfrage innerhalb der einzelnen Zufahrten wird mit Hilfe von Schleifendetektoren, die ca. 200m vor der Haltlinie installiert sind, prognostiziert.

Im Rahmen der Optimierung wird die globale Zeit in Optimierungshorizonte von je 10 s differenziert. Innerhalb jedes Optimierungshorizonts wird das Steuerungsproblem als Entscheidungsbaum interpretiert, der sich aus der Anzahl der Phasen und der Anzahl an Entscheidungspunkten zusammensetzt. Für die Dauer von Phasenübergängen und minimalen Freigabezeiten wird einheitlich ein Zeitbedarf von 2,5s definiert. Demzufolge ergeben sich vier Entscheidungspunkte je Phase pro Optimierungshorizont. Eine wesentliche Kenngröße innerhalb des Optimierungsverfahrens ist die Definition von dynamischen Gewichtungsfaktoren für einzelne Ströme in Abhängigkeit von der Verkehrsnachfrage. Auf Basis des Verhältnisses aus zur Verfügung stehendem Stauraum und prognostizierter Warteschlange können so einzelne Phasen bevorzugt geschaltet werden, um ein Überstauen einzelner Zufahrten zu vermeiden. Im Rahmen von Simulationsstudien wurde die entwickelte Steuerung innerhalb verschiedener Nachfrageszenarios erprobt und dessen Leistungsfähigkeit mit den Offline-Optimierungsverfahren TRANSYT-7F (HALE, 2005, ROBERTSON, 1969, ROBERTSON, BRETHERTON, 1974) und PASSER III (FAMBRO, CHAUDHARY, BONNESON et al., 1991) verglichen. Hierbei ist anzumerken, dass sowohl für die Optimierung der Steuerung mit TRANSYT-7F als auch mit PASSER III nur ein Nachfrageszenario definiert wurde. Die maximale Reduzierung der Verlustzeit um 32,5% im Vergleich zu TRANSYT-7F ist demzufolge zu relativieren, da in diesem Szenario die Verkehrsnachfrage um 65% von dem TRANSYT-7F Szenario abweicht. Unter konstanten äquivalenten Nachfragebedingungen konnten keine signifikanten Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der drei Verfahren festgestellt werden. Hervorzuheben ist die nachgewiesene dynamische Anpassung der entwickelten Steuerung an unterschiedliche Verkehrslagen. So wurde aufgezeigt, dass selbst bei einer geringen Zunahme von 10% in der Verkehrsnachfrage im Vergleich zum Referenzszenario bereits Reduzierungen von über 20% in den Verlustzeiten gegenüber TRANSYT-7F erzielt werden können. Anzumerken ist, dass die angenommene einheitliche Dauer von 2,5s für Phasenübergänge mit realen Mindestfreigabezeiten von 5s und realen Zwischenzeiten für Fußgängerströme >10s in Deutschland nicht vereinbar ist.

Eine Methode zur Steuerung einzelner verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen mit der Methode der Approximated Dynamic Programming (ADP) präsentiert CAI (2007). ADP ist eine der Dynamischen Programmierung verwandte Optimierungsmethode, die entwickelt wurde, um Entscheidungsprobleme mit einem großen Lösungsraum effizienter berechnen zu können. Innerhalb von ADP werden die einzelnen Variablen der zu optimierenden Zielfunktion nicht vollständig berechnet, sondern die Zielfunktion mit der Berechnung einzelner, ausgewählter Variablen

angenähert. Analog der Methode von FANG und ELEFTERIADOU (2006) handelt es sich um eine phasenbasierte Lichtsignalsteuerung. Das globale Entscheidungsproblem (optimale Phasendauer und -folge innerhalb eines definierten Zeitraums) wird gemäß des Optimalitätsprinzips der Dynamischen Programmierung in Teilprobleme differenziert. Jedes Teilproblem wird innerhalb eines Optimierungshorizonts von 10s gelöst. Als Zielfunktion wird die Minimierung der Verlustzeiten am Knotenpunkt definiert. Im Gegensatz zu FANG und ELEFTERIADOU (2006) nimmt CAI (2007) als einheitlichen Zeitbedarfswert für die Phasenübergangsdauer und die minimale Freigabezeit 5s an. Dementsprechend ergibt sich je Optimierungshorizont ein zweistufiger Entscheidungsbaum mit der Möglichkeit eines frühen Phasenwechsels zum Zeitpunkt  $t=0s$  und eines späten Phasenwechsels zum Zeitpunkt  $t=5s$ .

Zu Beginn jedes Optimierungshorizonts werden anhand von vorgelagerten Detektoren die Ankunftsdaten für jede Fahrbeziehung bestimmt. Die zu minimierenden Verlustzeiten ergeben sich aus den Ankunftsdaten, den bereits wartenden Fahrzeugen, den Servicewerten, den Signalfreigabeständen und einem statischen Gewichtungsfaktor. Der Gewichtungsfaktor bewertet hier bereits wartende Fahrzeuge höher als sich in der Zufahrt befindliche Fahrzeuge. Ziel der damit verbundenen Priorisierung noch fahrender Fahrzeuge ist die Reduzierung der Verlustzeiten am Gesamtknotenpunkt durch die Reduzierung von Anfahrvorgängen. Kritisch anzusehen ist in diesem Zusammenhang die nicht vorhandene Beschränkung von maximalen Wartezeiten für Nebenströme.

#### 4.5 Wahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens

Aus der Problemstellung der vorliegenden Arbeit ergeben sich einige Anforderungen, die ein Optimierungsverfahren zu erfüllen hat. Im Fokus stehen hier die benötigte Rechenzeit und die Güte der gefundenen Lösung.

Das Konzept des neuen dezentralen Steuerungsverfahrens sieht vor, dass sich die Steuerung dynamisch und schnell an sich ändernde Verkehrsnachfragen in den einzelnen Knotenpunktzufahrten anpassen kann. Im Idealfall soll ein haltfreies Passieren sich nähernder Fahrzeuge in Schwachverkehrszeiten ermöglicht werden. Dies bedingt, dass die Steuerung innerhalb des Zeitraums *Eintritt des Fahrzeuges in die Kommunikationsreichweite bis zum Passieren der Haltlinie* unter Berücksichtigung von Phasenübergangsdauern einen Phasenwechsel realisieren kann. Das Verfahren muss daher innerhalb kleiner Zeitfenster eine optimale Lösung finden. Dies bedingt eine geringe Rechenzeit, die wiederum primär von der Größe des Lösungsraums abhängig ist. Um dies zu erreichen, bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Geringe Größe des Lösungsraums und Verwendung von exakten Optimierungsverfahren,
- Reduzierung des Lösungsraums und Verwendung von exakten Optimierungsverfahren oder
- Annäherung der optimalen Lösung durch Verwendung von Heuristiken.

Betrachtet wird erneut das Beispiel einer vereinfachten 2-Phasensteuerung. Gesucht ist die optimale Verteilung der Freigabezeiten für die Phasen A und B innerhalb eines finiten Zeitraums von 60s. Der sich ergebende Lösungsraum umfasst bei einer angenommenen Mindestfreigabezeit und Phasenübergangsdauer von je 5s insgesamt 64 Lösungsmöglichkeiten (vgl. Ab-



schnitt 4.1). Innerhalb eines Netzwerkes mit mehreren Anlagen und zusätzlich zu optimierenden Versatzzeiten steigt die Anzahl an Lösungen allerdings um ein Vielfaches an. Zentrale Netzsteuerungsverfahren bedienen sich daher Heuristiken, um die optimale Lösung in kurzer Rechenzeit zumindest näherungsweise bestimmen zu können.

Innerhalb der beschriebenen Steuerungsverfahren für Knotenpunkte mit Dynamischer Programmierung wird auf Basis des Optimalitätsprinzips der entstehende Lösungsraum für Steuerungsstrategien durch die Diskretisierung des globalen Entscheidungsproblems in Teilprobleme kürzerer Dauer reduziert. Voraussetzung hierfür ist eine bekannte Verkehrsnachfrage für den betrachteten Zeitraum innerhalb des globalen Entscheidungsproblems. Für einen finiten Zeitraum von 60s und einem gewählten Optimierungshorizont von 10s würden sich beispielsweise drei Teilprobleme ergeben (vgl. CAI (2007)). Das formulierte Optimierungsproblem innerhalb der Optimierungshorizonte ist dabei identisch zu dem globalen Optimierungsproblem. Die geringe Anzahl an Lösungen innerhalb dieser Teilprobleme ermöglicht eine vollständige Enumerierung des Lösungsraums in kurzer Zeit.

Die in Abschnitt 5 detailliert beschriebene Systemarchitektur des neuen Steuerungsverfahrens sieht eine dezentrale Steuerung der Anlagen in einem Netzwerk vor. Jeder Knotenpunkt wird unabhängig von seinen Nachbarn lokal optimiert. Es erfolgt kein Austausch von Informationen zwischen den Anlagen im Netz oder mit einem Zentralrechner. Für die angenommenen Kommunikationsreichweite von ca. 280m und einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 50km/h ergibt sich ein Zeitfenster von ca. 20s zwischen der Detektion sich nähernder (kommunikationsfähiger) Fahrzeuge und dem Erreichen bzw. Passieren der Haltlinie. Innerhalb dieses Optimierungshorizonts muss zum einen die optimale Lösung für die Phasenfolge in kürzester Zeit bestimmt und zum anderen der Phasenübergang vollständig beendet werden.

Hieraus ergeben sich a priori Lösungsräume geringerer Größe durch:

- die Dezentralität der Steuerung und
- die finite Kommunikationsreichweite.

Die geringe Größe des Lösungsraums ermöglicht eine vollständige Enumeration aller möglichen Lösungen in kurzer Rechenzeit. Im betrachteten Beispiel einer 2-Phasensteuerung reduziert sich der Lösungsraum von 64 auf vier mögliche Lösungen (vgl. Abbildung 17). Gemäß BRAUN (2008) beträgt somit die Rechenzeit lediglich 0,04s. Selbst bei komplexeren Phasensteuerungen von fünf Phasen umfasst die Anzahl an Lösungen lediglich 25 und die entsprechende Rechenzeit 0,25s. Eine vollständige Enumeration des Lösungsraums in kurzer Rechenzeit ist somit auch für größere Knotenpunkte uneingeschränkt möglich. Innerhalb der Optimierungshorizonte erfolgen die Berechnungen aller zulässigen Lösungen und die Auswahl der exakten optimalen Lösung. Abbildung 17 zeigt die drei resultierenden sequentiellen Optimierungshorizonte für einen Zeitraum von 60s für das Beispiel einer 2-Phasensteuerung. In Abhängigkeit der im Rahmen dieser Dissertationsschrift angenommenen Kommunikationsreichweite von 280m entspricht die Länge eines Optimierungshorizonts dabei einem Zeitintervall von 20s.

Die Darstellung des Lösungsraums als Gitternetz(-segmente) gilt ausschließlich für Steuerungen mit zwei Phasen. Komplexere Steuerungen bedingen eine Darstellung des Gitternetzes im Raum. Im Folgenden wird daher das Entscheidungsproblem als Entscheidungsbaum dargestellt (vgl. Abbildung 17).



## **5 Konzept des dezentralen Steuerungsverfahrens**

### **5.1 Zielsetzung**

Ziel ist es, ein neuartiges dezentrales Steuerungsverfahren zu konzipieren,

- welches das zukünftig verfügbare Datenpotential an fahrzeuggenerierten Kommunikationsdaten sinnvoll nutzt, um den Verkehrsfluss in städtischen Straßennetzen deutlich zu verbessern,
- welches sich dynamisch verschiedenen Verkehrsnachfrageszenarios optimal und automatisch anpasst,
- welches Methoden und Strategien beinhaltet, die auch bei geringen bis mittleren Ausstattungsraten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen eine zuverlässige und robuste Verkehrslageschätzung sicherstellen,
- welches Priorisierungsstrategien, z.B. für den Öffentlichen Nahverkehr ermöglicht und planerische Randbedingungen für den Fußgängerverkehr berücksichtigt,
- welches die Koordinierung benachbarter Knotenpunkte ermöglicht,
- welches Freigabezeiten der einzelnen Phasen entsprechend der Verkehrsnachfrage optimal zuordnet, maximale Wartezeiten für Nebenströme sicherstellt und
- welches trotz seiner Dezentralität keine Instabilitäten in vermaschten Straßennetzen zulässt.

### **5.2 Formulierung des Verfahrens**

Der dezentrale Gedanke des Steuerungskonzepts sieht vor, dass jede Knotenpunktsteuerung für sich und unabhängig von weiteren Knotenpunktsteuerungen im Netz optimiert wird. Es werden keine Informationen zwischen den einzelnen Anlagen oder mit einer übergeordneten taktischen Ebene ausgetauscht.

Die Steuerung jedes Knotenpunkts erfolgt phasenbasiert. Die Zuordnung von Signalgruppen zu Phasen, die Bestimmung von Zwischenzeiten sowie die einzelnen Phasenübergänge sind im Vorhinein planerisch festzulegen. Die Anzahl der möglichen Phasen und Varianten an Phasenübergängen ist dabei unbeschränkt.

Entsprechend der angestrebten Flexibilität und dynamischen Anpassung der Steuerung an verschiedene Verkehrsnachfrageszenarios agiert die Steuerung azyklisch ohne Umlaufzeiten, Versatzzeiten oder statische Rahmen für Freigabezeiten. Obere und untere Grenzen für die Freigabezeitanteile bilden ausschließlich planerisch festgelegte minimale Freigabe- (FGSV, 2007) sowie maximale Wartezeiten.

Die globale Zeit ist unterteilt in kurze Zeitintervalle  $\Delta t$ . Auf Basis fahrzeuggenerierter Kommunikationsdaten werden zu jedem Zeitintervall  $\Delta t$  die am Ende eines Optimierungshorizonts  $4\Delta t$  zu erwartenden Rückstaulängen für jede Phase berechnet bzw. prognostiziert. Es wird schließlich diejenige Phasenfolge ausgewählt, welche eine formulierte Zielfunktion (vgl. Abschnitt 5.3) am besten erfüllt.

Im Vergleich zu traditionellen Steuerungsverfahren mit tageszeitabhängigen Festzeitprogrammen oder Rahmensignalplänen unterliegt die Leistungsfähigkeit des im Weiteren präsentierten Steuerungsverfahrens im geringeren Umfang tageszeitlichen Schwankungen in der Verkehrsnachfrage als heute in der Praxis eingesetzte Steuerungsverfahren und passt sich automatisch und dynamisch der augenblicklichen Verkehrsnachfrage in den Knotenpunktzufahrten an.

### 5.3 Optimierungsverfahren und Zielfunktion

Für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung wird die Methode der Vollständigen Enumeration verwendet (vgl. Abschnitte 4.3.1 und 4.5). Die globale Zeit wird in kurze Zeitintervalle gleicher Größe unterteilt. Erfahrungen aus DYPIC (ROBERTSON, BRETHERTON, 1974), PROLYN (HENRY, 1989, HENRY, FAGRGES, TUFFAL, 1983) und dem Verfahren nach CAI (2007) haben gezeigt, dass eine Intervallgröße von  $\Delta t=5s$  ausreichend diskret ist.

Realisierbare Kommunikationsreichweiten werden bis zu einer Entfernung von 1000m angenommen (CAR-2-CAR-CC, 2007). Dieser Wert ist allerdings nur außerorts unter idealen Bedingungen (keine Abschattung, hindernisfreier Kommunikation, etc.) möglich. Für den innerstädtischen Bereich wird daher eine deutlich geringere Kommunikationsreichweite von maximal 280m im Rahmen dieser Arbeit angenommen. Bei einer Detektion kommunikationsfähiger Fahrzeuge von 280m vor der Haltlinie können die zukünftigen Fahrzeugankünfte zu Beginn jedes Optimierungsintervalls  $\Delta t$  für einen Optimierungshorizont von  $4\Delta t=20s$  prognostiziert werden. Die Größe des Optimierungshorizonts entspricht zum einen der Zeit, die ein Fahrzeug bei ungehinderter Fahrt zwischen Eintritt in die Kommunikationsreichweite und Erreichen der Haltlinie bei einer mittleren Geschwindigkeit von 50km/h benötigt. Zum anderen ermöglicht das Zeitfenster von 20s die Integration von Zwischenphasen unter Berücksichtigung der auftretenden Zwischenzeiten für alle Verkehrsarten.

Das Entscheidungsproblem wird als Entscheidungsbaum betrachtet, dessen Anzahl an Lösungen sich aus der Anzahl an Phasen und möglichen Phasenwechseln ergibt. Abbildung 18 zeigt beispielhaft einen Entscheidungsbaum für eine dreiphasige Steuerung mit jeweils zwei verschiedenen Möglichkeiten des Phasenübergangs zwischen den Phasen 1 und 2 bzw. 1 und 3. Die Zahlen innerhalb der Entscheidungspunkte repräsentieren den Systemzustand, in diesem Fall die geschaltete Phase. Die Zeitpunkte der Phasenwechsel unterliegen dabei nicht der Zeitdiskretisierung von  $\Delta t=5s$  sondern können sekundlich abgerufen werden. In dem dargestellten Beispiel kann die aktuelle Phase 1 zu einem frühen Zeitpunkt  $t=0$  oder zu späteren Zeitpunkten  $t=2\Delta t$  bzw.  $t=2,5\Delta t$  gewechselt werden. Bei einem frühen Phasenwechsel würden

zeitnah Fahrzeuge aus einem konkurrierenden Strom bedient werden können, während bei einem späteren Phasenwechsel zunächst noch die Fahrzeuge aus Phase 1 abgefertigt werden würden. Unter der Annahme von  $i$  Phasen und  $n_{PU}$  möglichen Phasenübergängen ergibt sich die Größe des Lösungsraums  $m$  innerhalb des Entscheidungsbaums bzw. innerhalb jedes Optimierungshorizonts  $4\Delta t$  zu:

$$m(i) = i \cdot n_{PU} - 1 \quad (3)$$

Die geringe Anzahl an Lösungen ermöglicht eine vollständige Enumeration des Lösungsraums in kurzer Rechenzeit (vgl. Abschnitt 4.5). Als zu minimierende verkehrliche Kenngröße innerhalb der Zielfunktion wird die Gesamtrückstaulänge am Knotenpunkt gewählt. Das zu lösende Entscheidungsproblem lautet damit:

*Es sind diejenigen optimalen Phasendauern und -folgen innerhalb des Optimierungshorizonts zu finden, die die Gesamtrückstaulängen am Knotenpunkt minimieren.*

Der Nutzen von Rückstaulängen für die Qualität einer Lichtsignalsteuerung ist unbestritten (FGSV, 2007, FRIEDRICH, 1999). Trotz der Bedeutung von Rückstaulängen als Kenngröße im Rahmen des Qualitätsmanagements finden Rückstaulängen als Messgrößen nur selten Eingang in Steuerungsverfahren bzw. in Verfahren zur Bestimmung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs an Lichtsignalanlagen (FGSV, 2005, TRB, 2000). So werden Rückstaulängen, in der Regel analog zu mittleren Wartezeiten, mit Hilfe der ermittelbaren Kenngrößen *Zeitlücken* und *Belegungsgrad* nur indirekt über Modelle berechnet bzw. abgeschätzt. Der Grund dafür liegt primär in der verwendeten Detektorik in den Zufahrten von Lichtsignalanlagen. Trotz zahlreicher neuer Entwicklungen im Bereich der Verkehrserfassung werden sowohl bei bestehenden als auch bei in Planung befindlichen Lichtsignalanlagen überwiegend Induktionsschleifendetektoren zur Erfassung von Fahrzeugen verwendet, die in die Fahrbahn eingebaut werden (LEHNHOFF, 2005).

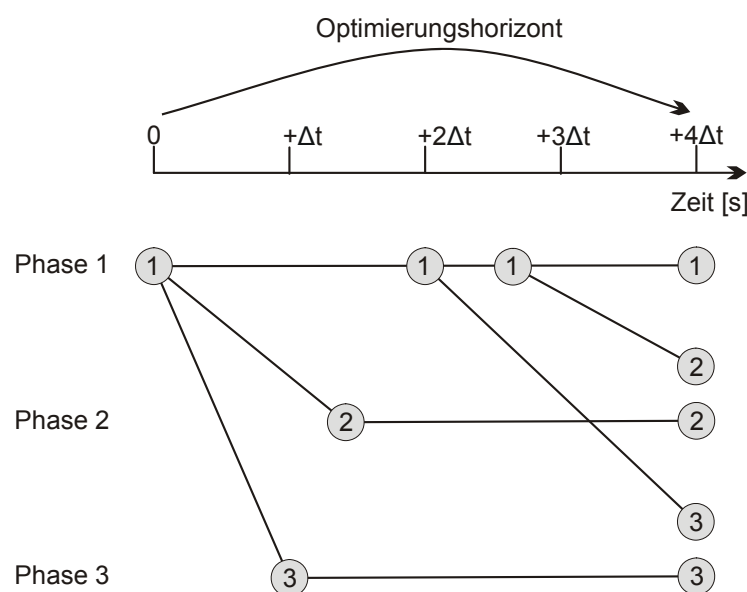


Abbildung 18: Entscheidungsbaum für eine 3-Phasensteuerung

Mit Hilfe der zukünftig verfügbaren Kommunikationsdaten kann anhand von kommunizierten Fahrzeug-Positionsdaten und der Kenntnis der Haltlinienlage direkt die Kenngröße Rückstaulänge als Messgröße innerhalb der Steuerung verwendet werden. Wesentlicher Vorteil ist die direkte und einfache Detektierbarkeit bei hohen Ausstattungsraten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen. In Abschnitt 5.5.1.2 werden die entsprechenden Methoden detailliert beschrieben. Für Szenarios mit mittleren bis geringen Ausstattungsraten wurde zudem ein Verfahren entwickelt, welches anhand von wenigen kommunikationsfähigen Fahrzeugen innerhalb der Warteschlange die gesuchte Kenngröße zuverlässig abschätzen kann (vgl. Abschnitt 5.5.1.3).

Nach vollständiger Enumerierung des Lösungsraums wird schließlich diejenige Lösung ausgewählt und lokal umgesetzt, welche die Zielfunktion erfüllt. Die mathematische Beschreibung der Zielfunktion erfolgt im Rahmen der verwendeten Eingangs- und Zustandsgrößen in Abschnitt 5.5.2.1.

## 5.4 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur des dezentralen Steuerungsverfahrens umfasst je signalisiertem Knotenpunkt folgende drei Bausteine (vgl. Abbildung 19):

- Kommunikationsfähige Onboard Units (OBUs) in Fahrzeugen, die sich innerhalb der Kommunikationsreichweite befinden,
- eine Road Side Unit (RSU) und
- ein Steuergerät mit entsprechenden Signalgebern.

Bei geringen bis mittleren Ausstattungsraten werden zudem Daten haltliniennaher Detektoren innerhalb des Steuerungsverfahrens verwendet, um die Stabilität in vermaschten Netzen und eine ausreichende Qualität des Verkehrsablaufs in den Nebenrichtungen sicherzustellen (vgl. Abschnitt 5.5.1.1).

Die RSU bildet den Kommunikationspartner zu den kommunikationsfähigen Fahrzeugen (WLAN-Verbindung) und dem Steuergerät der Lichtsignalanlage (LAN-Verbindung) und steht damit sowohl systemtechnisch als auch methodisch im Mittelpunkt des Systems. Die Generierung von optimierten Schaltbefehlen basiert auf der Definition von drei Modellen innerhalb der RSU, die in Abbildung 19 gezeigt und im Folgenden kurz erläutert werden:

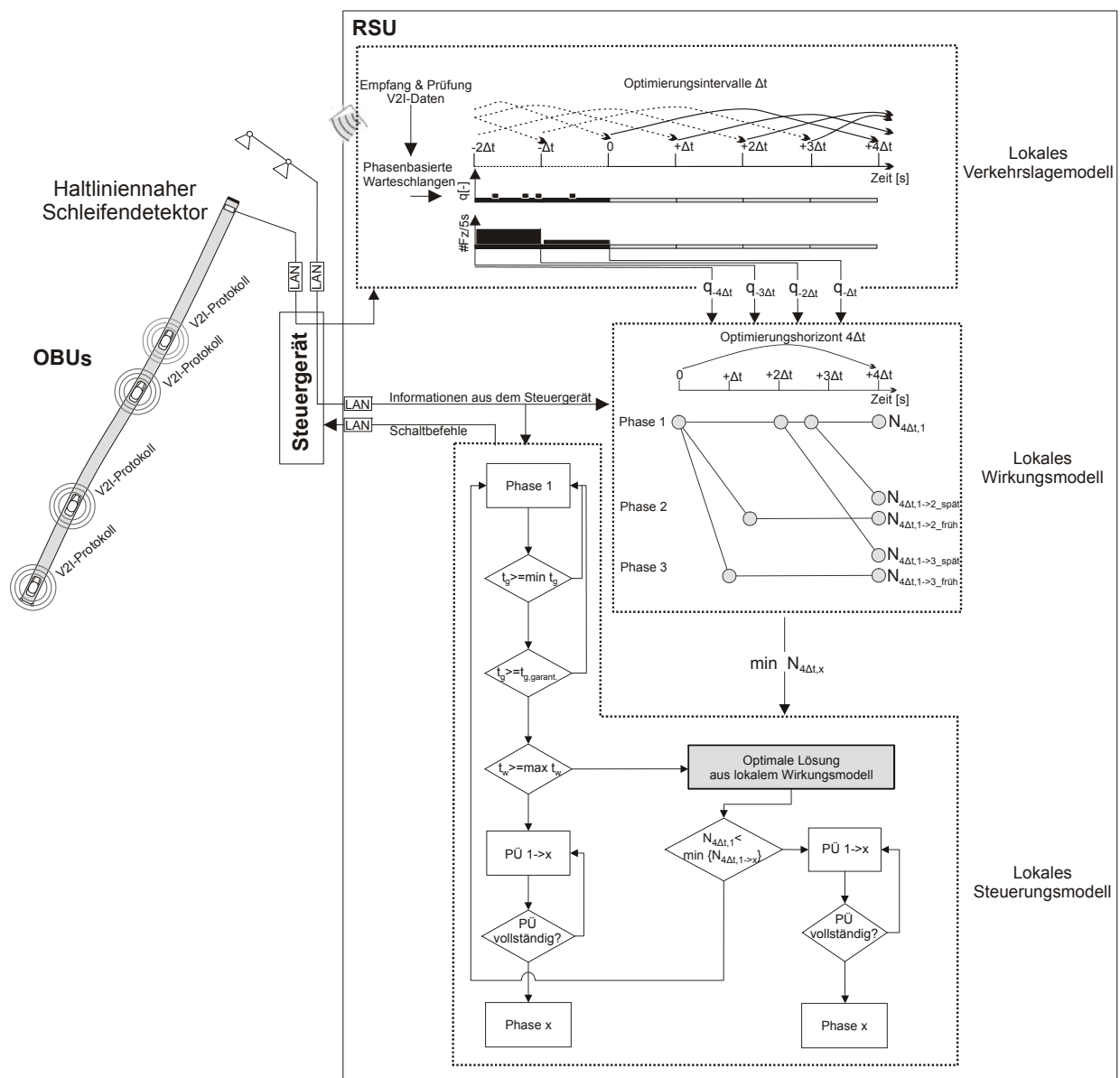
- Lokales Verkehrsmodell
- Lokales Wirkungsmodell
- Lokales Steuerungsmodell

Innerhalb der Kommunikationsreichweite senden Fahrzeuge, die mit einer OBU ausgestattet sind, periodisch fahrzeuggenerierte Informationen an die RSU via IEEE 802.11-Standard. Das Kommunikationsprotokoll umfasst die fahrzeuggenerierten Kenngrößen: aktuelle Position, aktuelle Geschwindigkeit, Fahrzeug-Identifikationsnummer (Fahrzeug-ID) und im idealen Fall die Route der Fahrzeuge bzw. den nächsten Abbiegewunsch. Verkehrsplanerische Informationen über die Topographie des Knotenpunktes, Phasen, minimale Freigabe- und maximale Wartezeiten sowie zulässige Phasenübergänge sind als statische Kenngrößen innerhalb der RSU hinterlegt.

Innerhalb des *lokalen Verkehrslagemodells* werden die gesendeten Daten kommunikationsfähiger Fahrzeuge empfangen und anhand eines Vergleichs mit den topographischen Informationen der Knotenpunktzufahrten phasendiskreten Warteschlangen zugeordnet. Je Optimierungsintervall  $\Delta t$  werden die empfangenen Daten aggregiert und stromabwärts propagiert (vgl. Abschnitt 5.5.1.5). Die in Abschnitt 5.5.1.3 beschriebene Methode zur Schätzung von maximalen Rückstaulängen auf Basis einzelner kommunikationsfähiger Fahrzeuge ist insbesondere bei geringen und mittleren Ausstattungsraten ein wichtiger Baustein im lokalen Verkehrsmodell. Die Auswertung von Daten bereits stehender Fahrzeuge anhand von Kommunikations- und lokalen Detektordaten vervollständigt das lokale Verkehrslagebild.

Die Informationen aus dem Verkehrslagemodell bilden die Eingangsdaten für das *lokale Wirkungsmodell*. Innerhalb des Wirkungsmodells werden für jede Phase und für jeden zulässigen Phasenwechsel die in den zukünftigen  $4\Delta t$  zu erwartenden Rückstaulängen bestimmt. In Abhängigkeit der Anzahl an Phasen und möglichen Phasenübergängen innerhalb des Optimierungshorizonts entsteht ein Lösungsraum, der in Abbildung 19 als Entscheidungsbaum dargestellt ist. Die geringe Anzahl an Lösungen ermöglicht die vollständige Enumerierung des Lösungsraums und die Bestimmung der optimalen Lösung. Hierfür sind neben der Kenntnis der detektierten Fahrzeuge in jeder Zufahrt, der aktuellen Freigabe- und Sperrzeiten die Kenntnis der phasendiskreten Serviceraten notwendig, welche beinhalten, wie viele Fahrzeuge je Optimierungsintervall  $\Delta t$  und Phase an der Lichtsignalanlage bedient werden können. Die einzelnen Eingangs- und Zustandsgrößen werden detailliert in Abschnitt 5.5.2.1 dargestellt.

Innerhalb des *lokalen Steuerungsmodells* werden zunächst planerische Nebenbedingungen überprüft. Dies sind primär die einzuhaltenden Mindestfreigabezeiten gemäß den Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) (FGSV, 2007) und die planerisch festgelegten maximalen Wartezeiten. Für die Sicherstellung maximaler Wartezeiten werden Daten haltliniennaher Detektoren verwendet. Nach Prüfung etwaiger Verletzungen von planerischen Kenngrößen erfolgt die Generierung von Schaltbefehlen. Für einen Optimierungshorizont von  $4\Delta t$  werden anhand der erzeugten phasenfeinen Warteschlangen sowie der aktuellen Schaltinformationen der Lichtsignalanlage optimierte Schaltbefehle generiert und an das Steuergerät kommuniziert. Im Steuergerät werden die generierten Schaltbefehle schließlich umgesetzt und der aktuelle Signalstatus wieder an die RSU zurück gesendet.



**Abbildung 19: Systemarchitektur des entwickelten Steuerungsverfahrens mit den vier Bausteinen je signalisiertem Knotenpunkt: Onboard-Units (OBUs) in kommunikationsfähigen Fahrzeugen, einer Road Side Unit (RSU), einem Steuergerät und haltliniennahen Detektoren in jeder Zufahrt. Innerhalb der RSU sind die Prozesse innerhalb der drei verwendeten Modelle: lokales Verkehrslagemodell, lokales Wirkungsmodell und lokales Steuerungsmodell schematisch dargestellt. Darstellungen mit höherer Auflösung zum lokalen Wirkungsmodell und lokalen Steuerungsmodell enthalten die Abbildung 32 und 35.**



## 5.5 Bausteine des Steuerungsverfahrens

Abbildung 20 verdeutlicht die Zusammenhänge der verwendeten drei Modelle innerhalb der RSU in Form eines Regelkreises. Die Prozesse innerhalb der Modelle werden im Folgenden detailliert beschrieben.

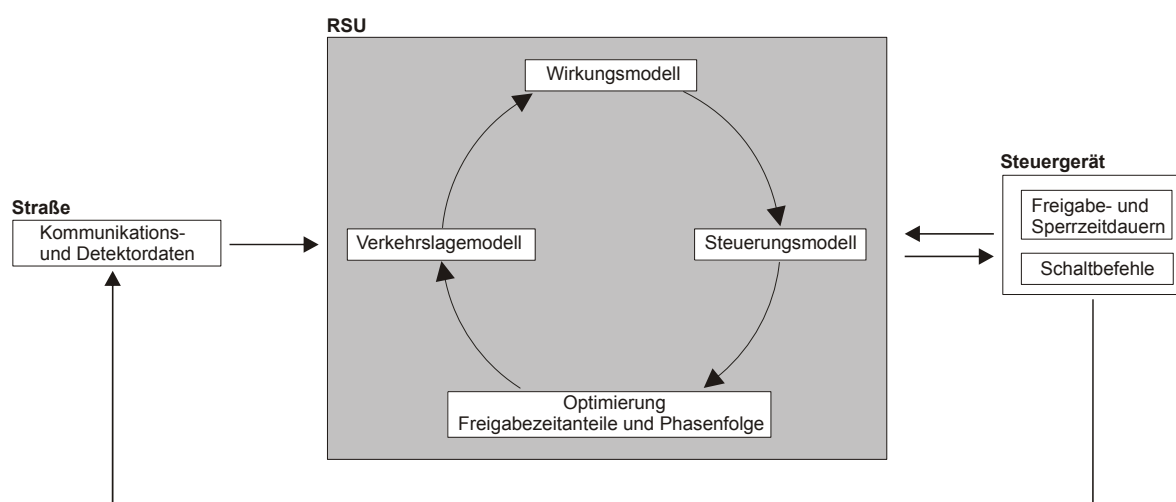


Abbildung 20: Regelkreis der lokalen Steuerung

### 5.5.1 Lokales Verkehrslagemodell

Für adaptive Steuerungsverfahren ist die genaue Bestimmung der Verkehrslage in den Zufahrten der einzelnen Knotenpunkte im Netz Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Lichtsignalsteuerung. Innerhalb des vorgestellten dezentralen Steuerungsverfahrens erfolgt die Detektion von Fahrzeugen primär mit Hilfe der zukünftig verfügbaren Kommunikationstechnologie zwischen OBUs und RSU. Ergänzt werden diese Informationen durch Daten haltliniennaher Detektoren (z.B. Induktionsschleifen), die insbesondere in Szenarios mit geringen Ausstattungsraten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen die Bedienung von Nebenströmen sicherstellt.

Für die Erstellung eines lokalen Verkehrslagebilds bei geringen und mittleren Ausstattungsraten wurde zudem eine Methode entwickelt, die anhand von Daten einzelner kommunikationsfähiger Fahrzeuge und Informationen aus der Steuerung, Gesamtrückstaulängen zuverlässig abschätzt. Die verwendeten Detektionsarten und die Methode zur Rückstauschätzung werden im Folgenden erläutert.

#### 5.5.1.1 Datenerfassung

##### Haltliniennahe Detektoren

In Szenarios mit geringen Ausstattungsraten sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass kommunikationsfähige und damit detektierbare Fahrzeuge die Kommunikationsreichweite erreichen, bevor eine Zufahrt mit Fahrzeugen ohne OBUs überstaut ist. Insbesondere in Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage ist dies äußerst kritisch.

Innerhalb des Steuerungsverfahrens würde die Nicht-Existenz von kommunikationsfähigen Fahrzeugen als eine freie Zufahrt ohne Rückstau interpretiert werden, obwohl diese bereits überstaut sein könnte. Die Folge wäre eine dauerhafte Sperrzeit für die entsprechende Zufahrt, die zunächst zu einem lokalen und später zu einem netzweiten Zusammenbruch des Verkehrsflusses aufgrund von Rückstaus in benachbarte Knotenpunkte führen könnte.

Vor diesem Hintergrund werden die fahrzeuggenerierten Kommunikationsdaten mit lokalen Detektordaten ergänzt. Die unmittelbar vor den Haltlinien befindlichen Detektoren in jeder Zufahrt dienen zur Anmeldung von Fahrzeugen ohne OBUs. Mit Hilfe der Restriktion von maximalen Warte- und minimalen Freigabezeiten kann so innerhalb des Steuerungsverfahrens sichergestellt werden, dass auch Nebenströme in Szenarios mit geringem Ausstattungsgrad in einem ausreichenden Maß bedient werden (vgl. Abschnitt 5.5.3.1).

### **Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**

Innerhalb des in Abschnitt 6.1 dargestellten Simulationsmodells senden kommunikationsfähige Fahrzeuge, die sich innerhalb der angenommenen Kommunikationsreichweite von maximal ca. 280 m befinden, in einer Frequenz von 5Hz Informationen an die RSU. Die Sendefrequenz orientiert sich an Randbedingungen aus dem Wirkungsmodell. Niedrigere Frequenzen von 0,5-1Hz sollten für den Einsatz im Feld ausreichen.

Das Sendeprotokoll umfasst folgende Informationen:

- Fahrzeug-ID,
- aktuelle Fahrzeugposition (z.B. in WGS 84 Koordinaten),
- aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und
- ggf. den nächsten Abbiegewunsch bzw. die Route des Fahrzeuges.

Anhand der Fahrzeug-ID wird innerhalb des Steuerungsverfahrens sichergestellt, dass jedes kommunizierende Fahrzeug in der Reichweite einer RSU eindeutig detektierbar ist. Ohne Kenntnis der Fahrzeug-ID wäre es diffizil, bereits detektierte Fahrzeuge von noch nicht detektierten Fahrzeugen innerhalb der Kommunikationsreichweite zu unterscheiden. Dabei ist es notwendig, dass das sendende Fahrzeug innerhalb einer Knotenpunktzufahrt seine Fahrzeug-ID beibehält.

Um die Anzahl der zu bearbeitenden Protokolle innerhalb der RSU zu reduzieren, erfolgt die Detektion kommunikationsfähiger Fahrzeuge nur bei Eintritt in die Kommunikationsreichweite und bei einem etwaigen Halt des Fahrzeuges. Eine kontinuierliche Verarbeitung der fahrzeuggenerierten Daten und eine damit mögliche Generierung und Verwendung von Trajektorien für die Modellierung des Verkehrs zwischen Eintritt in die Kommunikationsreichweite und Erreichen der Haltlinie sind entbehrlich (vgl. Abschnitt 5.5.1.5). Innerhalb des Steuerungsverfahrens werden daher Protokolle von sich bewegenden Fahrzeugen verworfen, die bereits von der RSU detektiert wurden. Erst im Falle eines Halts in der Zufahrt (übermittelte Geschwindigkeit  $\leq 1\text{km/h}$ ) wird das gesendete Protokoll erneut betrachtet. Die Analyse der Positionsdaten des haltenden Fahrzeugs in Kombination mit topographischen Informationen der Knotenpunktzufahrt ermöglicht dann eine erste Abschätzung der zu minimierenden Rückstaulängen (vgl. Abschnitt 5.5.1.3).

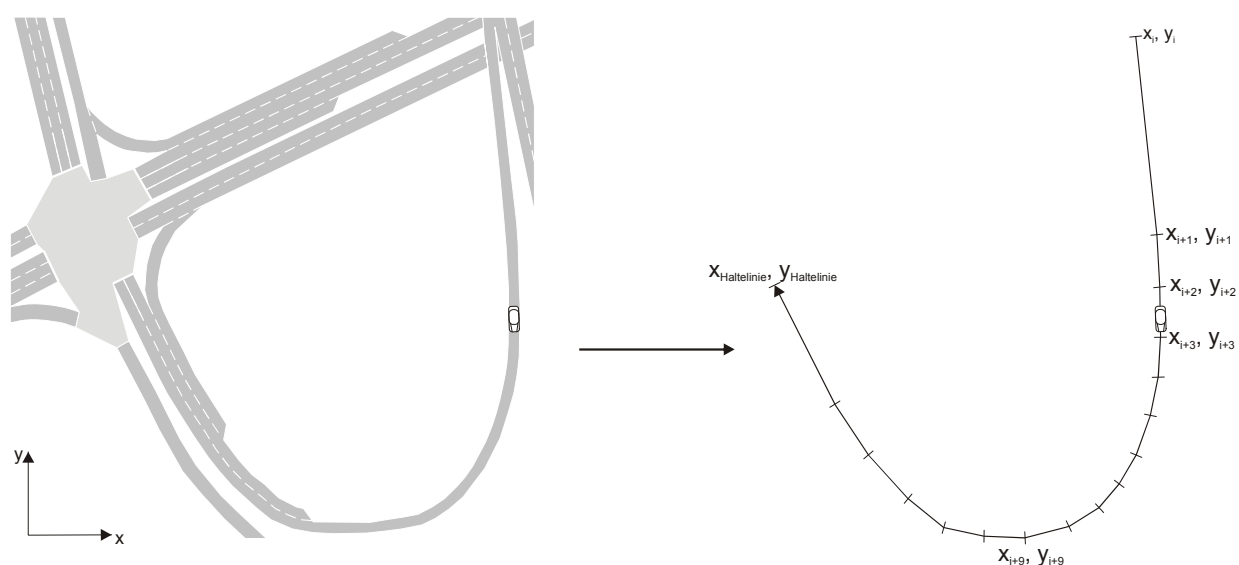
### 5.5.1.2 Methode zur Lokalisierung kommunizierender Fahrzeuge

Für das Steuerungsverfahren ist es essentiell, die Position der Kommunikationspartner möglichst exakt zu lokalisieren, um die detektierten Fahrzeuge phasenfeinen Warteschlangen zuzuordnen und deren Distanz zur Haltlinie im Falle eines Halts bestimmen zu können. In Abschnitt 3.6 wurde detailliert erläutert, welche Einflussfaktoren die Genauigkeit der übermittelten GPS-Daten beeinflussen. So zeigten verschiedene Studien, dass mit Hilfe von DGPS-Systemen eine fahrstreifenfeine Lokalisierung von Fahrzeugen realisierbar ist (DU, BARTH, 2008). Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wird vereinfacht eine Genauigkeit der GPS-Daten von einer halben Fahrstreifenbreite von ca. 1,5-2,0m angenommen.

Für die Zuordnung der Fahrzeuge zu den einzelnen Fahrstreifen und zur Distanzbestimmung zwischen Fahrzeug und Haltlinie werden Fahrstreifenfunktionen verwendet. Entsprechend der Ausprägung der Zufahrt werden diese entweder als eine lineare Funktion oder als Polygonzug abgebildet, der den Linienverlauf zwischen dem Beginn der Kommunikationsreichweite und der Haltlinie mathematisch beschreibt. Abbildung 21 zeigt beispielhaft die Beschreibung einer Schleifenrampe im Zuge eines teilplanfreien Knotenpunkts als Polygonzug. Die Funktionen der einzelnen Linienverläufe werden lokal innerhalb der RSU gespeichert und verwendet.

Befindet sich ein kommunikationsfähiges Fahrzeug in Kommunikationsreichweite, wird innerhalb der RSU anhand eines Datenabgleichs des gesendeten Protokolls und der Topologiedaten des Knotenpunkts überprüft, in welcher Zufahrt sich das Fahrzeug befindet. Im Falle eines Halts kann zusätzlich eruiert werden, in welchem Segment sich das Fahrzeug befindet. Mit Hilfe geometrischer Zusammenhänge und den Längen der weiteren Segmente, die sich zwischen Haltlinie und Fahrzeug befinden, wird abschließend die momentane Entfernung des wartenden Fahrzeuges zur Haltlinie bestimmt.

Die zuverlässige Fahrstreifen- und Distanzbestimmung ist eine zentrale Methode innerhalb des Steuerungsverfahrens und bestimmt maßgeblich die Qualität der Eingangsdaten.



**Abbildung 21: Fahrstreifenmatching und Distanzbestimmung bei nichtlinearen Linienverläufen**

### 5.5.1.3 Methode zur Rückstauschätzung anhand von Kommunikationsdaten

Um einen erwarteten Qualitätsverlust des neuen Steuerungsverfahrens bei geringen und mittleren Ausstattungsraten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen reduzieren zu können, wurde eine Methode zur Schätzung von maximal auftretenden Rückstaulängen je Sperrzeit entwickelt. Die Methode nutzt dabei ausschließlich das zukünftig verfügbare Potential an fahrzeuggenerierten Kommunikationsdaten sowie aktuelle Schaltinformationen. Wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist es, dass nur eine geringe Anzahl an kommunikationsfähigen Fahrzeugen innerhalb der Warteschlange ausreicht, um die Gesamtrückstaulänge zuverlässig zu schätzen.

Das Konzept des neuen Steuerungsverfahrens bedingt eine Abschätzung der momentan auftretenden bzw. in naher Zukunft (Optimierungshorizont von 20s) zu erwartenden Rückstaulängen in Abhängigkeit des Signalzustandes. Im Gegensatz zu dem anerkannten Verfahren nach MÜCK (2002) sollen daher nicht mittlere Rückstaulängen, sondern die tatsächlichen, maximalen Rückstaulängen je Sperrzeit abgeschätzt werden können.

Die entwickelte Methode bedient sich den Grundgedanken des Rückstauschätzers nach MÜCK sowie des Theorems nach LITTLE (1961) und nutzt die Vorteile der zukünftig verfügbaren Kommunikationsdaten. Die zu schätzende Rückstaulänge  $L$  wird zunächst differenziert nach einer gesicherten Rückstaulänge  $L_1$  und einer zu schätzenden Rückstaulänge  $L_2$ . Als gesicherte Rückstaulänge  $L_1$  wird die Distanz zwischen dem wartenden kommunikationsfähigen Fahrzeug und der Haltlinie definiert (Abbildung 22).

Die Rückstaulänge  $L$  ergibt sich somit zu:

$$L = L_1 + L_2 \quad (4)$$

mit:

- $L$ : Rückstaulänge
- $L_1$ : Distanz zwischen kommunikationsfähigem Fahrzeug und Haltlinie
- $L_2$ : Distanz zwischen letztem Fahrzeug in der Warteschlange und kommunikationsfähigem Fahrzeug

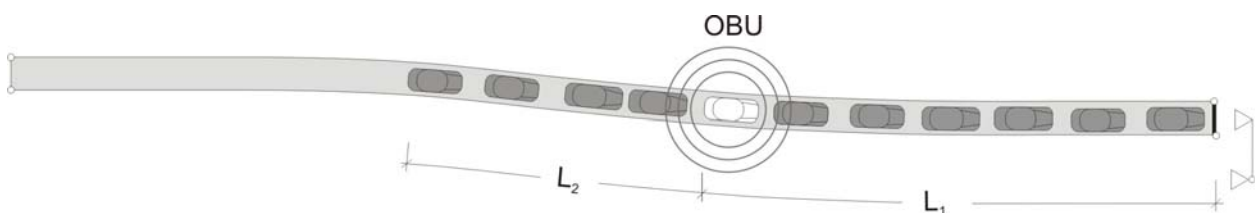


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Teillängen  $L_1$  und  $L_2$

Für die Schätzung von  $L_2$  wird das Theorem nach John D.C. Little (1961) verwendet:

*„In a queuing process, let  $1/\lambda$  be the mean time between the arrivals of two consecutive units,  $L$  be the mean number of units in the system, and  $W$  be the mean time spent by a unit in the system. It is shown that, if the three means are finite and the corresponding stochastic processes strictly stationary, and, if the arrival process is metrically transitive with nonzero mean, then*

$$L = \lambda \cdot W \quad (5)$$

Bezogen auf den Verkehrsablauf innerhalb signalisierter Knotenpunkte entspricht im Rahmen des Schätzverfahrens die Anzahl an Einheiten  $L$  der Anzahl an Fahrzeugen innerhalb von  $L$ , die an einer Servicestelle, der Lichtsignalanlage, mit einer Freigabezeit bedient werden:

$$E[L(t)] = \lambda(t) \cdot E[W(t)] \quad [Fz] \quad (6)$$

mit:

$E[L(t)]$ : Erwartungswert der Rückstaulänge [Fz]

$\lambda(t)$ : mittlere Ankunftsrate [Fz/s]

$E[W(t)]$ : Erwartungswert der Wartezeit [s]

Damit gilt für den zu schätzenden Anteil  $L_2$ :

$$L_2(t) = \lambda_2(t) \cdot w_2(t) \quad (7)$$

mit:

$L_2(t)$ : Rückstaulänge zwischen kommunikationsfähigem Fahrzeug und Warteschlangenende [Fz]

$\lambda_2(t)$ : Ankunftsrate bezogen auf  $L_2$  [Fz/s]

$w_2(t)$ : maximale Wartezeit in  $L_2$  [s]

Die Ankunftsrate  $\lambda_2$  ist definiert als das Verhältnis an Fahrzeugen in  $L_2$  pro Zeiteinheit; hier die Anzahl der Fahrzeuge zwischen Warteschlangenende und kommunikationsfähigem Fahrzeug, bezogen auf das Zeitintervall zwischen der Ankunft des kommunikationsfähigen Fahrzeugs in der Warteschlange und dem Anfahren des letzten Fahrzeuges in der Warteschlange nach Freigabezeitbeginn (Abbildung 23).

Die exakte Bestimmung von  $\lambda_2$  ist nur bei einer Penetrationsrate von 100% möglich. Innerhalb der Zielsetzungen für die Funktionalität des neuen Steuerungsverfahrens wurde die dynamische Anpassung der Freigabezeiten an die augenblickliche Verkehrslage in sehr kurzen Zeitintervallen definiert (vgl. Abschnitt 5.1). Es wird daher vereinfacht angenommen, dass der Ankunftsprozess innerhalb einer Sperrzeit bzw. bis zur Ankunft eines zweiten kommunikationsfähigen Fahrzeuges in der Warteschlange nicht stochastisch sondern deterministisch ist.

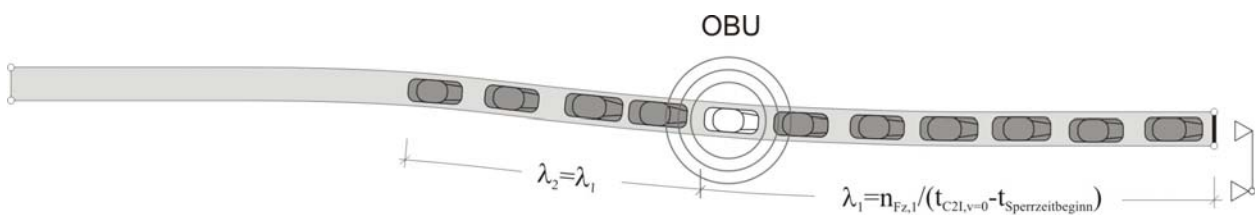
Dann gilt vereinfacht:

$$E[\lambda_2(t)] = E[\lambda_1(t)] = \frac{n_{Fz,l}}{t_{C2l,v=0} - t_{Sperrzeitbeginn}} \quad (8)$$

mit:

$E[\lambda_1(t)]$ :	Erwartungswert für die Ankunftsrate $\lambda_1$ [Fz/s]
$E[\lambda_2(t)]$ :	Erwartungswert für die Ankunftsrate $\lambda_2$ [Fz/s]
$n_{Fz,l}$ :	Distanz zwischen kommunikationsfähigem Fahrzeug und Haltlinie [m]
$t_{C2l, v=0}$ :	Ankunft des kommunikationsfähigen Fahrzeugs in Warteschlange [s]
$t_{Sperrzeitbeginn}$ :	Sperrzeitbeginn [s]

Schätzfehler, die in der Stochastizität des Verkehrsflusses begründet sind, werden im Zuge einer Plausibilitätskontrolle reduziert. Grobe Schätzfehler der Ankunftsrate  $\lambda_2$  um ein Vielfaches resultieren in der Regel entweder aus der Ankunft von einem Fahrzeugpulk mit kommunikationsfähigen Fahrzeugen unmittelbar nach dem Beginn der Sperrzeit oder einem Vorrücken von Fahrzeugen innerhalb von Warteschlangen in Folge nicht vollständig abgebauter Rückstaus. Die geschätzte Ankunftsrate  $\lambda_2$  wird daher einer gewählten maximalen Ankunftsrate gegenübergestellt, die gemäß dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) (FGSV, 2005) einer bei kurzen Freigabezeiten auftretenden Sättigungsverkehrsstärke von 3.000Fz/h entspricht. Ist die aktuell geschätzte Ankunftsrate  $\lambda_2$  höher als dieser Grenzwert, so wird anstelle der geschätzten Ankunftsrate  $\lambda_2$  vereinfacht eine maximale Ankunftsrate von 0,883Fz/s je Fahrstreifen bis zur Ankunft eines weiteren kommunikationsfähigen Fahrzeuges in der Warteschlange für  $\lambda_2$  gewählt.



**Abbildung 23: Schematische Darstellung der Ankunftsraten  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$**

Der Erwartungswert der maximalen Wartezeit  $E[\max w_2]$  je Sperrzeit ist zum einen davon abhängig, wie lange die verbleibende Sperrzeit ist und zum anderen wie schnell das letzte Fahrzeug in der Warteschlange nach Beginn der Freigabezeit anfahren kann, nachdem sich der Rückstau aufgelöst hat. Folglich setzt sich die maximale Wartezeit aus der verbleibenden Restrotzeit  $t_r$  und der so genannten Blocking Time  $t_b$  zusammen, welche als Zeitintervall zwischen dem Beginn der Freigabezeit und dem Zeitpunkt des tatsächlichen Anfahrens des letzten Fahrzeuges in der Warteschlange definiert ist (vgl. Abbildung 24).

Damit gilt ((2) in (1)):

$$\begin{aligned}
 E[L_2(t_r + t_b)] &= \lambda_2(t_r + t_b) \cdot E[W(t_r + t_b)] \\
 &= E[\lambda_1(t_{C2I, v=0} - t_{\text{Sperrzeitbeginn}})] \cdot E[W(t_r + t_b)] \\
 &= \lambda_1 \cdot E[W(t_r + t_b)]
 \end{aligned} \quad (9)$$

mit:

$$E[W(t_r + t_b)] = W(t_r + t_b(d)) = t_r + E[t_b(d)] \quad (10)$$

mit:

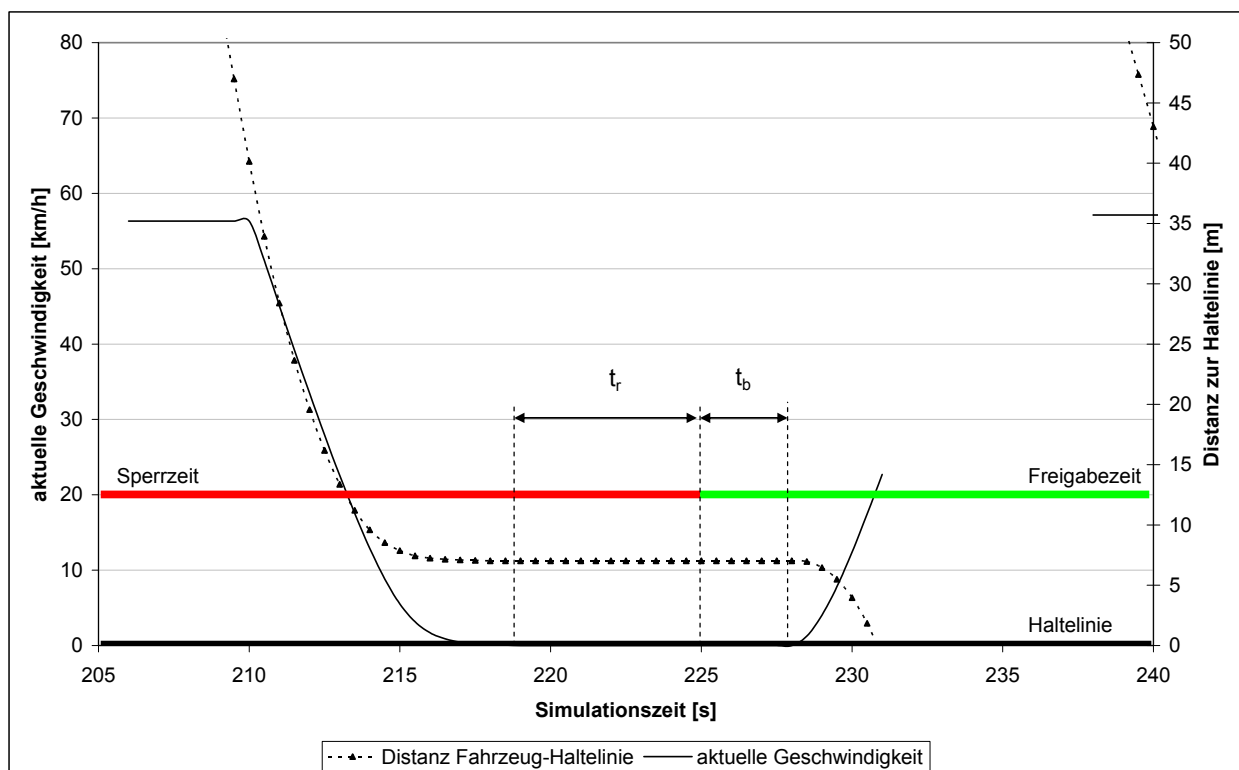
$E[W(t_r + t_b)]$ : Erwartungswert der maximalen Wartezeit in  $L_2$

$t_r$ : Restzeit nach Ankunft des letzten kommunikationsfähigen Fahrzeugs [s]

$t_b$ : Blocking Time [s]

$d$ : Distanz zwischen letztem Fahrzeug in der Warteschlange und Haltlinie [m]

Die Kenngröße Blocking Time  $t_b$  ist abhängig vom Reaktionsvermögen der Fahrer und dem Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge. Beide Parameter beeinflussen das Zeitfenster der Rückstauauflösung.



**Abbildung 24: Schematische Darstellung der Blocking Time  $t_b$  als Zeitdifferenz zwischen Beginn der Freigabezeit und dem tatsächlichem Anfahren**

Aktuelle empirische Untersuchungen zum Anfahrverhalten von Fahrzeugen an Lichtsignalanlagen (HOFFMANN, NIELSEN, 1994, KÜCKING, 2008) wurden mit umfangreichen Videoanalysen durchgeführt. Auch hier wurde anhand von Videoaufnahmen an mehreren signalisierten Knotenpunkten in Hannover sowie einem Abstandslinienraster, welches über das Videobild gelegt wurde, die Zeit gemessen, die zwischen Freigabezeitbeginn und tatsächlichem Anfahren der einzelnen Fahrzeuge verstreicht. KÜCKING (2008) konnte einen guten linearen Zusammenhang (vgl. Abbildung 25) zwischen der Distanz zur Haltlinie und der Blocking-time aufzeigen ( $R^2=0,69$ ), die innerhalb der Schätzmethode verwendet wird.

Abbildung 25 zeigt den empirisch ermittelten linearen Zusammenhang zwischen  $t_b$  und der Distanz zur Haltlinie  $d$ . Die zur Bestimmung von  $t_b$  notwendige Distanz des letzten Fahrzeuges der Warteschlange zur Haltlinie wird anhand der verbleibenden Sperrzeit abgeschätzt zu:

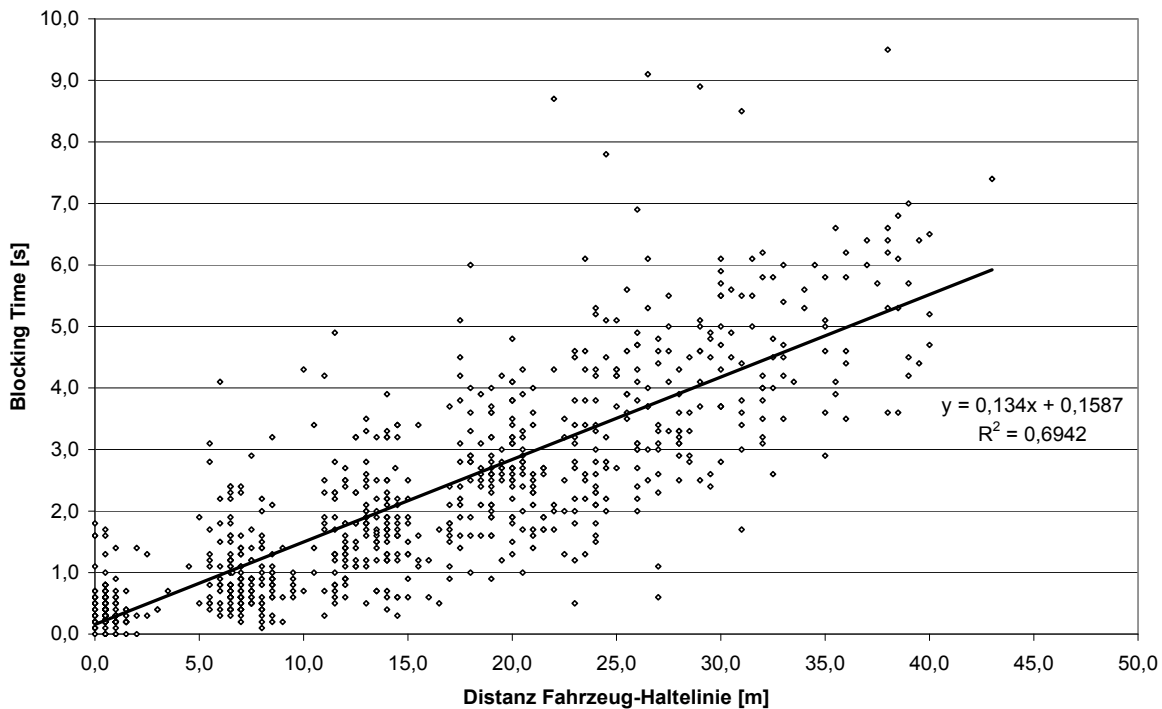
$$d = n_{Fz,l} + \lambda_l \cdot t_r \quad (11)$$

Für den Erwartungswert der maximalen Wartezeit  $E[W(t_r+t_b)]$  gilt ((11) in (10)):

$$E[W(t_r+t_b)] = t_r + E[t_b(n_{Fz,l} + \lambda_l \cdot t_r)] \quad (12)$$

$E[L_2(t_r+t_b)]$  ist dann ((12) in (9)):

$$E[L_2(t_r+t_b)] = \lambda_l \cdot (t_r + E[t_b(n_{Fz,l} + \lambda_l \cdot t_r)]) \quad (13)$$



**Abbildung 25: Darstellung der Blocking Time in Abhängigkeit zur Distanz des betrachteten Fahrzeuges zur Haltlinie (KÜCKING, 2008)**

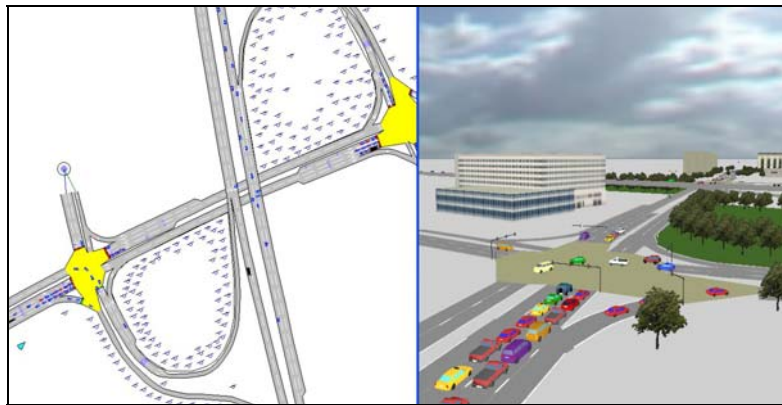


Der Erwartungswert der gesuchten maximalen Rückstaulänge  $E[L(t_r+t_b)]$  ergibt sich schließlich zu:

$$E[L(t_r+t_b)] = n_{Fz,l} + \lambda_l \cdot (t_r + E[t_b(n_{Fz,l} + \lambda_l \cdot t_r)]) \quad [Fz] \quad (14)$$

Treffen mehrere kommunikationsfähige Fahrzeuge innerhalb einer Sperrzeit in derselben Warteschlange ein, so ist für die Rückstaulängenschätzung das letzte kommunikationsfähige Fahrzeug relevant.

Die Güte des Schätzverfahrens wurde mit Hilfe des Simulationsmodells AIMSUN NG (vgl. Abschnitt 6.1) bewertet. Als Untersuchungsgebiet wurde ein Teilbereich des AKTIV-VM-Testnetzes genutzt, welches die Bundesautobahnen 5 und 67 zwischen Darmstadt und Mannheim sowie die Umleitungsstrecke Bundesstraße 47 zwischen Lorsch und Bensheim umfasst (vgl. Abschnitt 3.2). Die auf dieser Umleitungsstrecke befindlichen zwei festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen dienen der Überprüfung des entwickelten Rückstauschätzers (Abbildung 26).

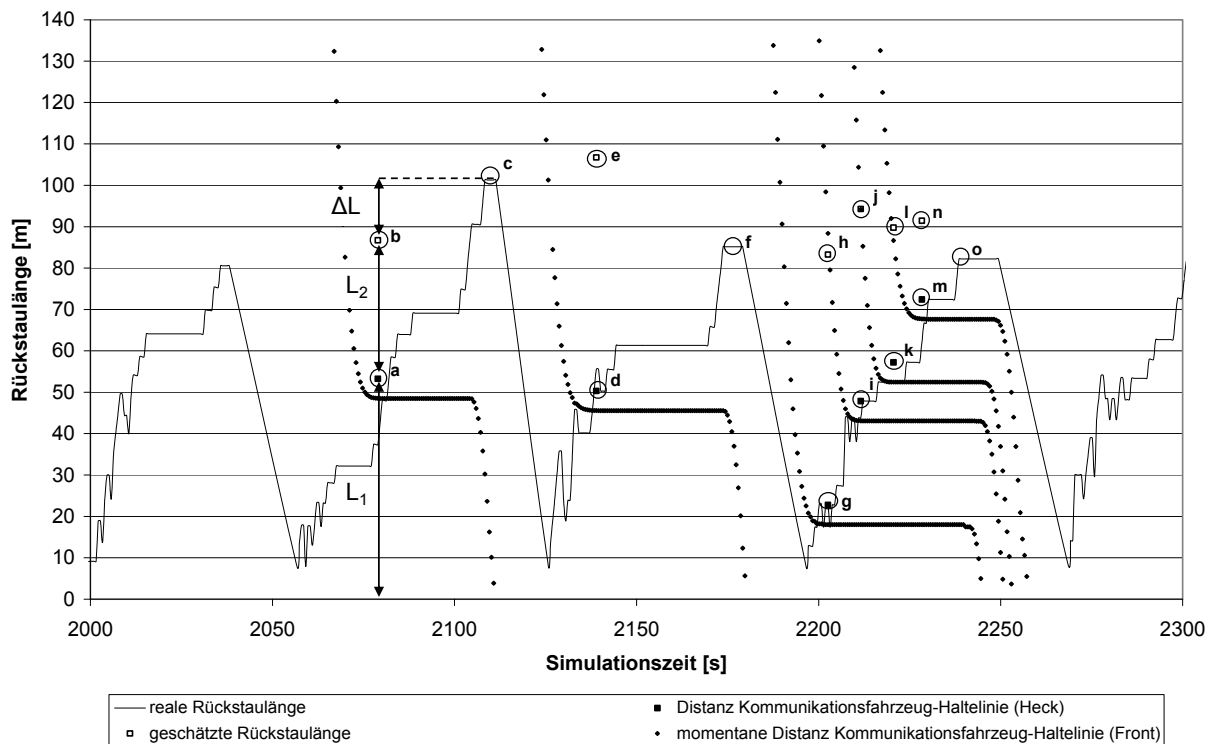


**Abbildung 26: Testfeld für die Bewertung der Methode zur Rückstauschätzung im Labor: Festzeit-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Zuge der B47 im Bereich der AS Bensheim**

Neben den geschätzten Rückstaulängen ist die Kenntnis der wahren Rückstaulängen zwingend erforderlich. In diesem Fall entsprechen die wahren Rückstaulängen den in der Simulation gemessenen Rückstaulängen. Aus diesem Grund wurde die Distanz zur Haltlinie aller stehenden Fahrzeuge bestimmt, die sich innerhalb der Kommunikationsreichweite befinden.

Abbildung 27 zeigt ein Beispiel für die Analyse der Simulationsdaten. Die dargestellten periodischen Maxima stellen die wahren Rückstaulängen je Umlaufzeit dar, die in diesem Beispiel ihr Maximum mit ca. 102m bei Simulationssekunde 2108 erreichen. Als eine Folge von Punkten, die vertikal das Diagramm durchlaufen, sind die kommunizierten Positionsdaten, umgerechnet in Distanzwerte, in das Diagramm integriert. Je enger hier die Punktfolge ist, desto langsamer bewegt sich das kommunikationsfähige Fahrzeug innerhalb des betrachteten Fahrstreifens. Befindet es sich in der Warteschlange, verläuft die Punktfolge horizontal bis zu dem Zeitpunkt, an dem es nach Beginn der Freigabezeit und nach Auflösung des stromabwärtigen Rückstaus wieder beschleunigen kann. Befindet sich ein kommunikationsfähiges Fahrzeug in der Warteschlange, beginnt die dargestellte Methodik zur Rückstauschätzung. Zur Veranschaulichung wird ein Beispiel betrachtet. In Simulationssekunde 2066 nähert sich ein kommunikationsfähiges Fahrzeug der Lichtsignalanlage. Aufgrund der in diesem Moment geschalteten Sperrzeit und dem hieraus folgendem Rückstau verringert es

seine Geschwindigkeit und kommt ca. 53m (48m + mittlere Fahrzeuglänge) vor der Haltlinie zum Stehen (vgl. Punkt (a) in Abbildung 27). Auf Basis der aus  $\lambda_1$  abgeleiteten Ankunftsrate  $\lambda_2$  zwischen Haltlinie und kommunikationsfähigem Fahrzeug wird  $L_2$  auf 33m und folglich die Gesamtrückstaulänge  $L$  auf ca. 86m (b) geschätzt, was im Vergleich zu der realen Rückstaulänge von ca. 100m (c) einer Unterschätzung von 16m bzw. ca. 3Fz entspricht. In der folgenden Sperrzeit wird die reale Rückstaulänge von 85m (Punkt (f)) um ca. 20m überschätzt (Punkt (e)). Im Verlauf der nächsten Sperrzeit treffen insgesamt vier kommunikationsfähige Fahrzeuge in der Warteschlange ein. Folglich wird während der Sperrzeit viermal die Gesamtrückstaulänge  $L$  geschätzt, wobei die Schätzung anhand des zuletzt ankommenden Fahrzeugs mit OBU, aufgrund des größeren Zeithorizonts, als zuverlässiger eingeschätzt und im Steuerungsverfahren verwendet wird. In allen vier Fällen wird die reale Rückstaulänge von ca. 82m (Punkt (o)) nahezu exakt geschätzt zu 83m (Punkt (h)), 94m (Punkt (j)), 89m (Punkt (i)) bzw. 91m (Punkt (n)).



**Abbildung 27: Auszug aus der Datenanalyse zur Bewertung der Methode zur Rückstauschätzung**

Die Güte der Rückstauschätzung hängt maßgeblich von der Schätzung der Ankunftsrate  $\lambda_2$  ab. Abbildung 28 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Schätzfehler der Ankunftsrate  $\Delta\lambda_2$  und dem entsprechenden Schätzfehler der Rückstaulänge  $\Delta L$ . Unter der Annahme einer Toleranzgrenze von  $\Delta L = \pm 20\text{m}$  zeigt Abbildung 28, dass ein Schätzfehler der Ankunftsrate zwischen  $\Delta\lambda_2 > 0.15$  und  $\Delta\lambda_2 < -0.05$  zu einem Schätzfehler  $\Delta L$  außerhalb der definierten Toleranz führt.

Abbildung 29 zeigt die Güte der dargestellten Methode. Verglichen wurden die geschätzten und gemessenen Längen von 212 Rückstauereignissen auf zwei Fahrstreifen innerhalb eines signalisierten Knotenpunkts im Zuge einer Bundesstraße 47 (vgl. Abbildung 26). Um die Güte

der Methodik effektiv analysieren zu können, wurden die Simulationen mit reinem Pkw-Verkehr durchgeführt. Die dargestellten Zwischenergebnisse zeigen, dass ca. 80% der geschätzten Rückstaulängen innerhalb der vordefinierten Toleranz von  $\pm 20\text{m}$  liegen. In ca. 45% aller betrachteten Ereignisse liegt sogar eine sehr gute Übereinstimmung ( $|\Delta L| \leq 10\text{m}$ ) zwischen Mess- und Schätzergebnis vor.

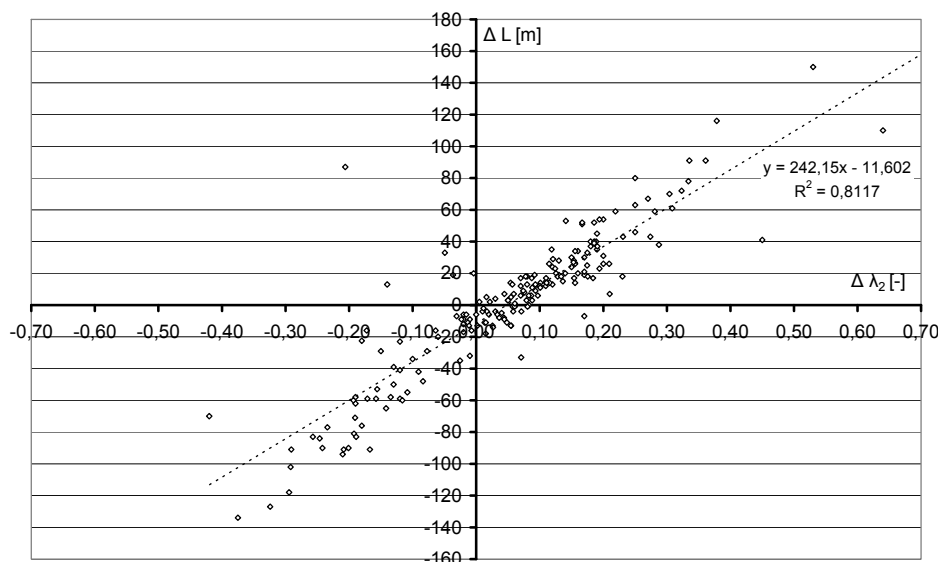


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen der Fehlschätzung der Ankunftsrate  $\Delta\lambda_2$  und dem hieraus resultierenden Schätzfehler  $\Delta L$

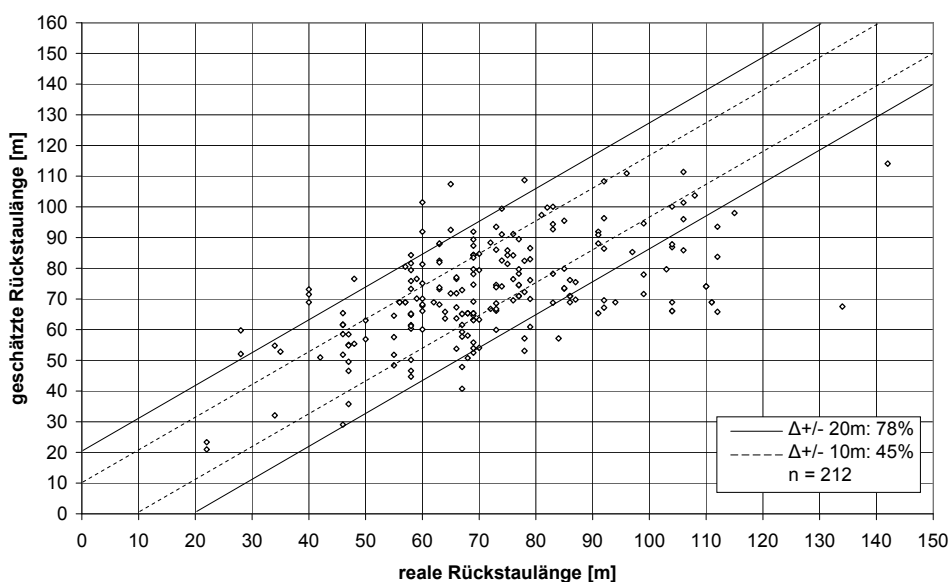


Abbildung 29: Schätzgüte der Methode zur Rückstaulängenschätzung anhand einer Stichprobe von 212 zu schätzenden Rückstaulängen. Gegenüberstellung der realen und geschätzten Rückstaulängen; Bewertung der Schätzgüte anhand von zwei gewählten Fehlertoleranzen: 10m (~1-2 Fahrzeuge, 20m (~3-4 Fahrzeuge))

#### 5.5.1.4 Integration der Methode zur Rückstauschätzung in das lokale Verkehrslagemodell

Innerhalb des lokalen Verkehrslagemodells unterstützt die beschriebene Methode zur Rückstauschätzung die bisherige Verkehrslageerkennung anhand aggregierter V2I-Kommunikationsdaten (Abbildung 30). Fahrzeuge mit der kommunizierten Geschwindigkeit  $v \leq 1 \text{ km/h}$  werden als stehende Fahrzeuge innerhalb einer Warteschlange interpretiert. Anhand des Abstandes zwischen kommunikationsfähigem Fahrzeug und Haltlinie (gesicherte Staulänge  $L_1$ ) und der Zeitdifferenz zwischen Ankunft des Fahrzeuges in der Warteschlange und Beginn der Sperrzeit wird die Ankunftsrate  $\lambda_1$  bestimmt und  $\lambda_2$  gleichgesetzt. Die Staulängen werden je Optimierungsintervall  $\Delta t$  für den Zeitraum  $\Delta t = 5 \text{ s}$  gemäß der beschriebenen Methode abgeschätzt. Eine Aktualisierung der Ankunftsrate erfolgt zu jedem Optimierungsintervall  $\Delta t$  bzw. bei Ankunft weiterer kommunikationsfähiger Fahrzeuge in der Warteschlange.

Die Anzahl der sich nähernden Fahrzeuge wird ebenfalls anhand der Ankunftsrate  $\lambda_1$  für ein Zeitintervall von jeweils  $\Delta t = 5 \text{ s}$  abgeschätzt. Der geschätzte Wert wird je Optimierungsintervall für  $\Delta t$  stromabwärts propagiert, bis die Fahrzeuge die Haltlinie passieren bzw. in der Warteschlange eintreffen. Die maximale Gültigkeit einer geschätzten Ankunftsrate beträgt somit  $20 \text{ s}$ . Auf diese Weise wird sichergestellt, dass sich signifikante Schätzfehler in der Ankunftsrate nicht über größere Zeitintervalle fortpflanzen. Das hier verwendete Prinzip des Gleitenden Horizontes wird im folgenden Abschnitt 5.5.1.5 detailliert beschrieben. Die Abschätzung der Anzahl aller ankommenden Fahrzeuge mit Hilfe der Ankunftsrate  $\lambda_1$  bedingt allerdings die Existenz von Warteschlangen mit kommunikationsfähigen Fahrzeugen. Im Zuge von Freigabezeiten oder Warteschlangen ohne OBUs würde das Verfahren davon ausgehen, dass sich kein Fahrzeug in der Zufahrt befindet. Innerhalb des lokalen Verkehrslagemodells wird daher der Schätzwert der tatsächlichen Anzahl detektierter Fahrzeuge mit OBUs gegenübergestellt. Zur Prognose der phasendiskreten Warteschlangen wird dann der höhere der beiden Werte im lokalen Wirkungsmodell verwendet.

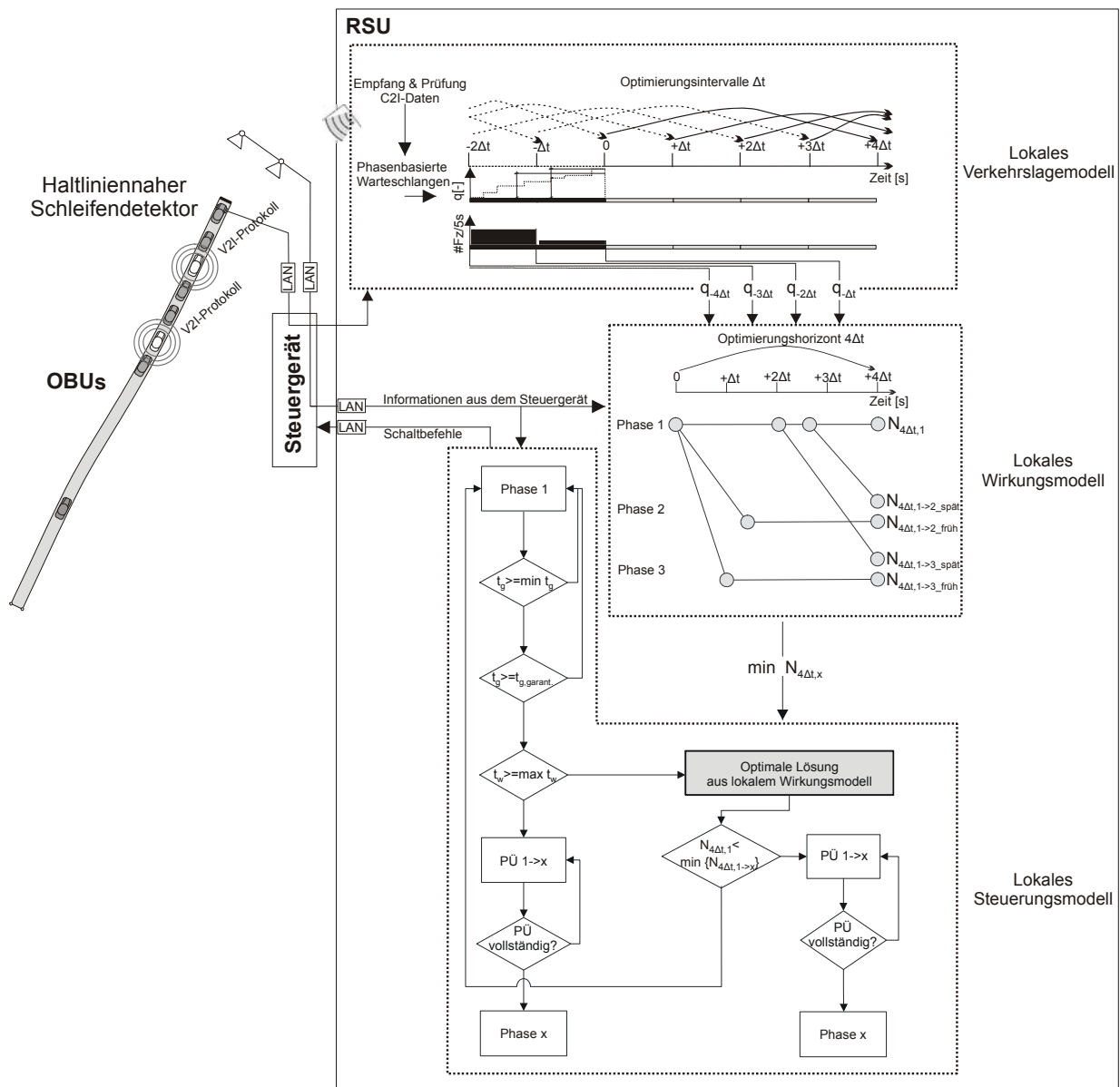


Abbildung 30: Schematische Darstellung zur Integration der Methode zur Rückstauschätzung in das entwickelte Steuerungsverfahren (vgl. Abbildung 19)

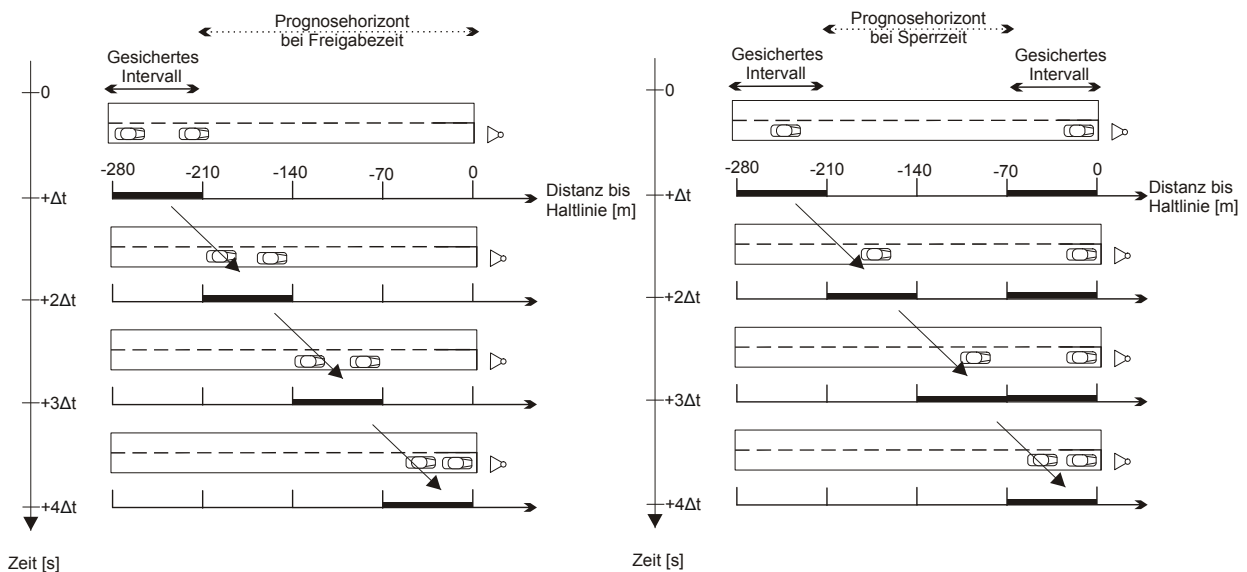
### 5.5.1.5 Erfassung und Prognose der Verkehrssituation

Die Formulierung der Zielfunktion bedingt die möglichst exakte Prognostizierung der Warteschlangenlängen für den Optimierungshorizont  $4\Delta t$ . Als Eingangsgrößen zur Bestimmung der Rückstaulängen werden ausschließlich fahrzeuggenerierte Kommunikationsdaten verwendet. Wie in Abschnitt 5.5.1.1 bereits erläutert, werden die gesendeten Kommunikationsdaten nur bei Eintritt des Fahrzeuges in die Kommunikationsreichweite und bei einem Halt des Fahrzeuges ausgewertet, um Ressourcen innerhalb der RSU zu schonen.

Die Optimierung der Steuerung basiert allerdings auf Informationen bzgl. der Verkehrslage über den gesamten Optimierungshorizont  $4\Delta t$ . Diese werden mit Hilfe der Methode des Gleitenden Horizontes (GARTNER, 1982) abgebildet. Hierzu wird der Optimierungshorizont in vier Zeitintervalle von je 5s diskretisiert. Es wird unterschieden zwischen einem gesicherten Intervall zu

Beginn der Kommunikationsreichweite (210-280m vor der Haltlinie) und einem Prognosehorizont (verbleibende Distanz bis zur Haltlinie, Abbildung 31). Je Optimierungsintervall  $\Delta t$  werden die neu in die Kommunikationsreichweite eintretenden Fahrzeuge mit OBUs zu phasen-diskreten Warteschlangen zusammengefasst. Im Falle von eigenen Phasen für Linksabbieger bedingt dies eine Übermittlung von Abbiegewünschen bzw. Routen vom Fahrzeug an die RSU. Diese gesicherten Informationen werden innerhalb des Prognosehorizonts zu jedem Optimierungsintervall um das Zeitintervall  $\Delta t$  stromabwärts propagiert. Dabei wird angenommen, dass sich die Fahrzeuge zwischen dem Beginn der Kommunikationsreichweite und Erreichen der Haltlinie bzw. dem Erreichen der Warteschlange mit einer konstanten Geschwindigkeit fortbewegen.

Im Fall einer momentanen Sperrzeit und einer bereits existierenden Warteschlange mit einem kommunikationsfähigen Fahrzeug kann die Distanz zwischen kommunikationsfähigem Fahrzeug und Haltlinie ebenfalls als gesichert angenommen. Der Prognosehorizont verkürzt sich entsprechend der Länge der Warteschlange (vgl. Abbildung 31). Das zweite gesicherte Intervall am Ende des Optimierungshorizonts beinhaltet somit Informationen über die Anzahl der bereits wartenden Fahrzeuge in den einzelnen phasen-diskreten Warteschlangen. Die Erfassung der Fahrzeuge sowie das Aggregieren und Propagieren der Einzelfahrzeugdaten findet unabhängig von etwaigen Phasenübergängen zu Beginn jedes Optimierungsintervalls  $\Delta t$  statt.



**Abbildung 31: Schematische Darstellung zur Propagierung von kommunikationsfähigen Fahrzeugen bei Freigabe- und Sperrzeit (Prinzip des Gleitenden Horizonts)**

### 5.5.2 Lokales Wirkungsmodell

Auf Basis der planerisch festgelegten Phasen und Phasenübergänge sowie Informationen aus dem Verkehrslagemodell werden innerhalb des lokalen Wirkungsmodells die Rückstaus für alle zulässigen Phasenwechsel prognostiziert. Die hierzu notwendigen Eingangs- und Zustandsgrößen sowie Strategien für Koordinierungs- und Priorisierungsmaßnahmen werden nachfolgend dargestellt.

### 5.5.2.1 Eingangs- und Zustandsgrößen

In den Abschnitten 5.2 und 5.3 wurde das Konzept des Steuerungsverfahrens und das verwendete Optimierungsverfahren ausführlich dargestellt. Die globale Zeit wird dabei in Optimierungsintervalle  $\Delta t$  zu je 5s diskretisiert.

Das Konzept der dezentralen Lichtsignalsteuerung bedingt eine Gruppierung von Signalgruppen in Phasen. Dabei muss jede Signalgruppe in mindestens einer Phase eine Freigabezeit erhalten. Die Anzahl an Phasen und Phasenübergängen ist dabei unbeschränkt. Die Phasen  $i, \dots, n$  bzw. die entsprechenden Signalgruppen können folgende Zustände  $X$  annehmen.

$$X_{\Delta t} = \begin{bmatrix} x_{1,\Delta t} \\ x_{i,\Delta t} \\ \vdots \\ x_{n,\Delta t} \end{bmatrix}, \text{ und } x_{i,\Delta t} = \begin{cases} 0 & \text{Sperrzeit} \\ 1 & \text{Freigabe} \\ 2 & \text{Phasenübergang} \end{cases} \quad (15)$$

Die entsprechenden Fahrzeugströme innerhalb einer Phase erhalten ein identisches Signalbild (Freigabe bzw. Sperrung). Für jede Phase  $1, \dots, i$  wird die Gesamtanzahl an bereits wartenden Fahrzeugen zu Beginn jedes Optimierungsintervalls  $\Delta t$  zu der Warteschlangenvariablen  $L_0$  zusammengefasst. In Abhängigkeit des Signalbilds werden die Warteschlangen innerhalb des Steuerungsverfahrens unterschiedlich erfasst. Warteschlangen mit augenblicklicher Sperrzeit werden zu Beginn jedes Optimierungshorizonts anhand von Kommunikationsdaten bestimmt bzw. abgeschätzt (vgl. Abschnitt 5.5.1.3). Aufgrund der diffizilen messtechnischen Erfassung von Rückstauauflösungen wird die prognostizierte Anzahl an wartenden Fahrzeugen mit Freigabezeit aus dem vorherigen Optimierungshorizont  $4\Delta t$  abgeleitet.

$$L_{0,\Delta t} = \begin{bmatrix} l_{0,1,\Delta t} \\ l_{0,i,\Delta t} \\ \vdots \\ l_{0,n,\Delta t} \end{bmatrix} [Fz] \quad (16)$$

Die zu Beginn jedes Optimierungsintervalls  $\Delta t$  neu in die Reichweite eintretenden kommunikationsfähigen Fahrzeuge werden zusammengefasst zu:

$$Q_{\Delta t} = \begin{bmatrix} q_{1,\Delta t} \\ q_{i,\Delta t} \\ \vdots \\ q_{n,\Delta t} \end{bmatrix} [Fz] \quad (17)$$

Wie bereits in Abschnitt 5.5.1.4 detailliert beschrieben, werden die sich nähernden Fahrzeuge  $Q_{\Delta t}$  nach dem Prinzip des Gleitenden Horizonts zu Beginn jedes Optimierungsintervalls um ein Zeitintervall  $\Delta t$  stromabwärts propagiert.

$$Q_{\Delta t} = \begin{bmatrix} q_{1,\Delta t} \\ q_{i,\Delta t} \\ \vdots \\ q_{n,\Delta t} \end{bmatrix} \xrightarrow{+\Delta t} Q_{2\Delta t} = \begin{bmatrix} q_{1,2\Delta t} \\ q_{i,2\Delta t} \\ \vdots \\ q_{n,2\Delta t} \end{bmatrix} \xrightarrow{+\Delta t} Q_{3\Delta t} = \begin{bmatrix} q_{1,3\Delta t} \\ q_{i,3\Delta t} \\ \vdots \\ q_{n,3\Delta t} \end{bmatrix} [Fz] \quad (18)$$

Die Servicerate  $S_{\Delta t}$  beschreibt die Anzahl der Fahrzeuge, die innerhalb eines Zeitintervalls  $\Delta t$  von einer Lichtsignalanlage bedient werden können. In Abhängigkeit der Topologie des Knotenpunkts, der Phasendefinition, der Existenz von bedingten Linksabbiegern und eines aktuellen frühen bzw. späten Phasenwechsels wird  $S_{\Delta t}$  im Voraus planerisch für jede Phase definiert. Der gewählte Maximalwert für  $s_{i, \Delta t}$  entspricht einer Sättigungsverkehrsstärke von 2880Fz/h.

$$S_{\Delta t} = \begin{bmatrix} s_{1, \Delta t} \\ s_{i, \Delta t} \\ \vdots \\ s_{n, \Delta t} \end{bmatrix}, \text{ und } s_{i, \Delta t} = \begin{cases} 0 \Rightarrow x_{i, \Delta t} = 0 \\ q_{i, \Delta t} \Rightarrow x_{i, \Delta t} = 1 \wedge q_{i, \Delta t} - s_{i, \Delta t} \leq 0 \\ s_{i, \Delta t} [1.0 \dots 4.0 \text{ Fz}] \Rightarrow (x_{i, \Delta t} = 1 \vee x_{i, \Delta t} = 2) \wedge q_{i, \Delta t} - s_{i, \Delta t} > 0 \end{cases} \quad (19)$$

Die aktuellen Wartezeiten  $W_{\Delta t}$ , die die ersten Fahrzeuge in jeder phasendiskreten Warteschlange erfahren, werden anhand von Kommunikationsdaten und Daten haltliniennaher Detektoren bestimmt. Die einzelnen Wartezeiten werden als Vielfache von  $\Delta t$  intern gespeichert. Die maximal zulässige Wartezeit wird gewählt zu  $14\Delta t$  bzw. 70s. Bei Überschreitung dieser Obergrenze wird ein entsprechender Phasenwechsel unabhängig von der aktuellen Verkehrslage erzwungen (vgl. Abschnitt 5.5.3.2). Zu Beginn jedes Optimierungsintervalls  $\Delta t$  erfolgt eine Aktualisierung von  $w_{\Delta t}$ :

$$W_{\Delta t} = \begin{bmatrix} w_{1, \Delta t} \\ w_{i, \Delta t} \\ \vdots \\ w_{n, \Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1, \Delta(t-1)} + \Delta t \\ w_{i, \Delta(t-1)} + \Delta t \\ \vdots \\ w_{n, \Delta(t-1)} + \Delta t \end{bmatrix}, \text{ und } w_{i, \Delta t} = \begin{cases} 0.0 \text{ s} \Rightarrow I_{0, i, \Delta t} = 0 \\ w_{i, \Delta t} [5.0 \dots 70.0 \text{ s}] \Rightarrow I_{0, i, \Delta t} > 0 \end{cases} \quad (20)$$

Zusätzlich wird ein Gewichtungsfaktor  $G$  eingeführt, der das zentrale Regelungselement innerhalb der Steuerungsablaufs darstellt. Der Gewichtungsfaktor  $G$  wird für folgende Regelungsstrategien verwendet werden:

- Priorisierung von ÖPNV-Fahrzeugen, Sondereinsatzfahrzeugen (vgl. Abschnitt 5.5.2.3),
- Koordinierungsstrategien für benachbarte Knotenpunkte (vgl. Abschnitt 5.5.2.3) und
- Gewichtung von Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage.

Im Zuge der Gewichtung von Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage werden bereits wartende Fahrzeuge innerhalb des Steuerungsverfahrens höher bewertet. Die vorhandene tatsächliche Warteschlange wird so als eine (deutlich) längere Warteschlange interpretiert. Ziel dieser Strategie ist die Sicherstellung einer zeitnahen Abfertigung von Fahrzeugen in Nebenströmen an Knotenpunkten mit einem ausgeprägten Hauptstrom. Der Gewichtungsfaktor  $g_{\Delta t}$  wird für Nebenströme in Abhängigkeit der bereits verstrichenen Wartezeiten sukzessive um einen gewählten Anteil von 2% je  $\Delta t$  erhöht und ergibt sich zu:



$$G_{\Delta t} = \begin{bmatrix} g_{1,\Delta t} \\ g_{i,\Delta t} \\ \vdots \\ g_{n,\Delta t} \end{bmatrix} + 0.02 \cdot \begin{bmatrix} w_{1,\Delta t} / \Delta t \\ w_{i,\Delta t} / \Delta t \\ \vdots \\ w_{n,\Delta t} / \Delta t \end{bmatrix}, \text{ und } g_{i,\Delta t} = \begin{cases} 1.0 \Rightarrow x_{i,\Delta t} = 1 \\ 1.0 \leq g_{i,\Delta t} \leq 2.0 \Rightarrow x_{i,\Delta t} = 0 \\ 1.0 \leq g_{i,\Delta t} \leq 99.0 \Rightarrow \text{Priorisierung, Koordinierung} \end{cases} \quad (21)$$

Abbildung 32 zeigt das bereits in Abschnitt 5.3 dargestellte Beispiel eines Entscheidungsbaums für eine dreiphasige Steuerung. Die aufgelöste Form des Baumes verdeutlicht die fünf verschiedenen Lösungen für die Phasensteuerung. Der entstehende Lösungsraum wird in jedem Optimierungsintervall  $\Delta t$  für den Optimierungshorizont  $4\Delta t$  vollständig enumeriert.

Die Anzahl an wartenden Fahrzeugen  $n_{i,4\Delta t,x}$ , die je Phase  $i$  für einen bestimmten Phasenübergang  $x$  am Ende des Optimierungshorizonts zu erwarten ist, wird prognostiziert zu:

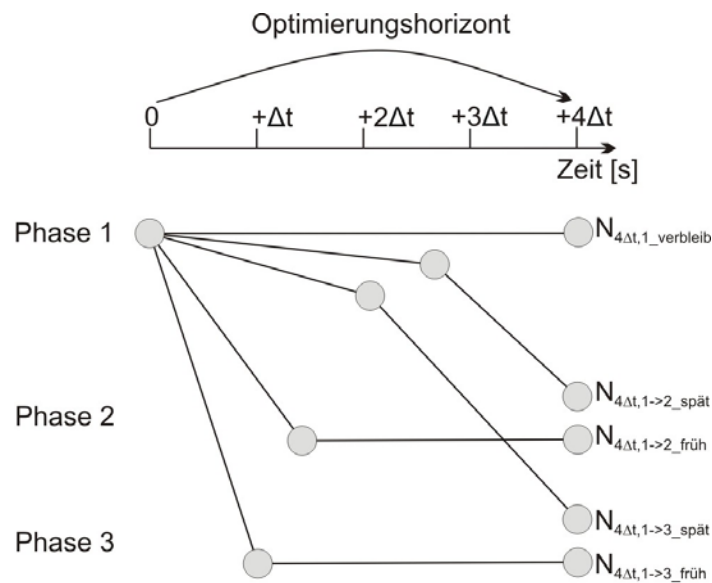
$$n_{i,4\Delta t,x} = g_{i,t} \cdot l_i(q_{i,-\Delta t}, s_{i,-\Delta t}, x_{i,-\Delta t}) + \sum_{t=0}^{4\Delta t} [g_{i,t} \cdot (q_{i,t} - s_{i,t}(q_{i,t}, s_{i,t}, x_{i,t}))] \quad (22)$$

Die zu minimierende Gesamtrückstaulänge  $N_{4\Delta t,x}$  am Knotenpunkt über  $4\Delta t$  für einen bestimmten Phasenübergang bzw. -verbleib  $x$  ergibt sich dann aus den phasenbasierten Warteschlangen  $n_{i,4\Delta t,x}$  zu:

$$N_{4\Delta t,x} = \sum_{i=1}^n \left[ G_i \cdot L_0(Q_{-\Delta t}, S_{-\Delta t}, X_{-\Delta t}) + \sum_{t=0}^{4\Delta t} [G_t \cdot (Q_t - S_t(Q_t, S_t, X_t))] \right] \quad (23)$$

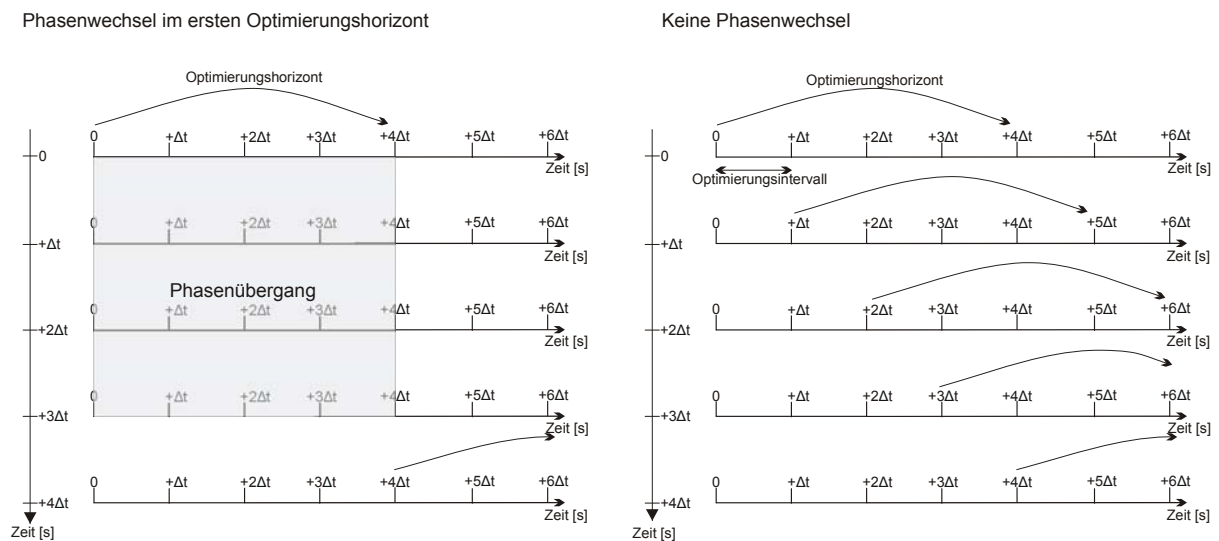
Nachfolgend wird für jeden zulässigen Phasenübergang  $x$  die Gesamtrückstaulänge  $N_{4\Delta t,x}$  innerhalb des Steuerungsverfahrens berechnet. Abbildung 32 zeigt die fünf Lösungen für das Steuerungsbeispiel. Weitere Lösungen, wie z.B. die Phasenfolge 1-2-3 innerhalb eines Optimierungshorizonts, sind aufgrund der zu gewährleistenden Zwischenzeiten in der Regel nicht möglich und werden daher nicht betrachtet. Auf Basis des vollständig enumerierten Lösungsraums wird gemäß der gewählten Zielfunktion diejenige Phasenkombination  $x$  für den aktuellen Optimierungshorizont ausgewählt, welche die Gesamtrückstaulänge am Knotenpunkt minimiert:

$$\min_x \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ G_i \cdot L_0(Q_{-\Delta t}, S_{-\Delta t}, X_{-\Delta t}) + \sum_{t=0}^{4\Delta t} [G_t \cdot (Q_t - S_t(Q_t, S_t, X_t))] \right] \right\} \quad (24)$$



**Abbildung 32: Entscheidungsbaum für eine dreiphasige Steuerung in detaillierter Form**

Führt die Lösung der Zielfunktion zu einem Phasenübergang, erfolgt die nächste Optimierung nach Beendigung des Optimierungshorizonts von  $4\Delta t$ . Die prognostizierten Rückstaulängen für die Phase mit Freigabe werden gespeichert und innerhalb des nächsten Optimierungshorizonts als Anfangsstaulänge  $I_i$  verwendet. Entspricht die Lösung der Zielfunktion einem Verbleib in der aktuellen Phase, erfolgt kein Phasenübergang. Der nächste Optimierungshorizont wird dann bereits nach einem Optimierungsintervall  $\Delta t$  betrachtet (vgl. Abbildung 33). Die für den Optimierungshorizont  $4\Delta t$  prognostizierten Rückstaulängen sind folglich entsprechend dem verkürzten Prognosehorizont  $\Delta t$  anzupassen, bevor sie als Anfangsstaulänge  $I_i$  im nächsten Optimierungsintervall verwendet werden.



**Abbildung 33: Schematische Darstellung der betrachteten Optimierungshorizonte bei Phasenübergängen und bei Phasenverbleib**

### 5.5.2.2 Phasenübergänge

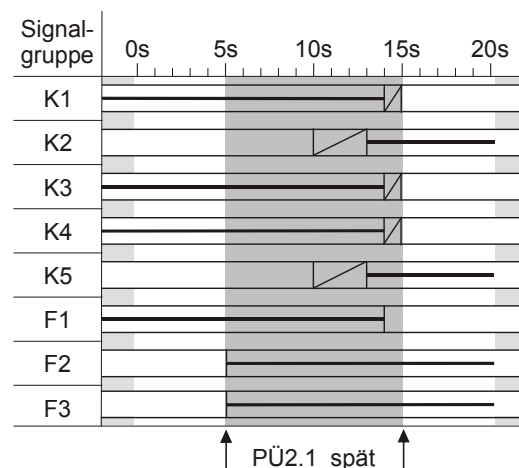
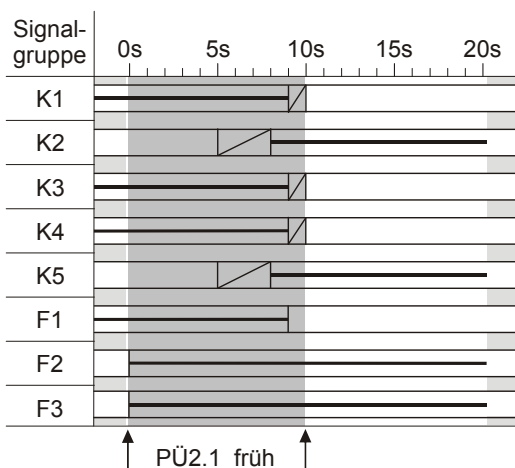
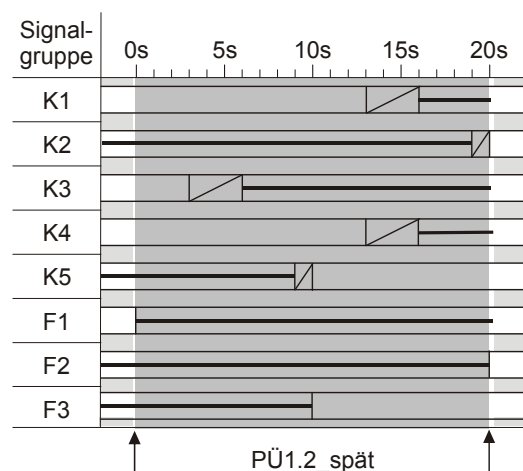
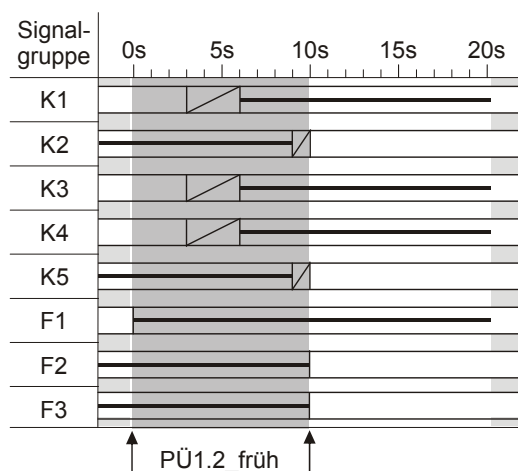
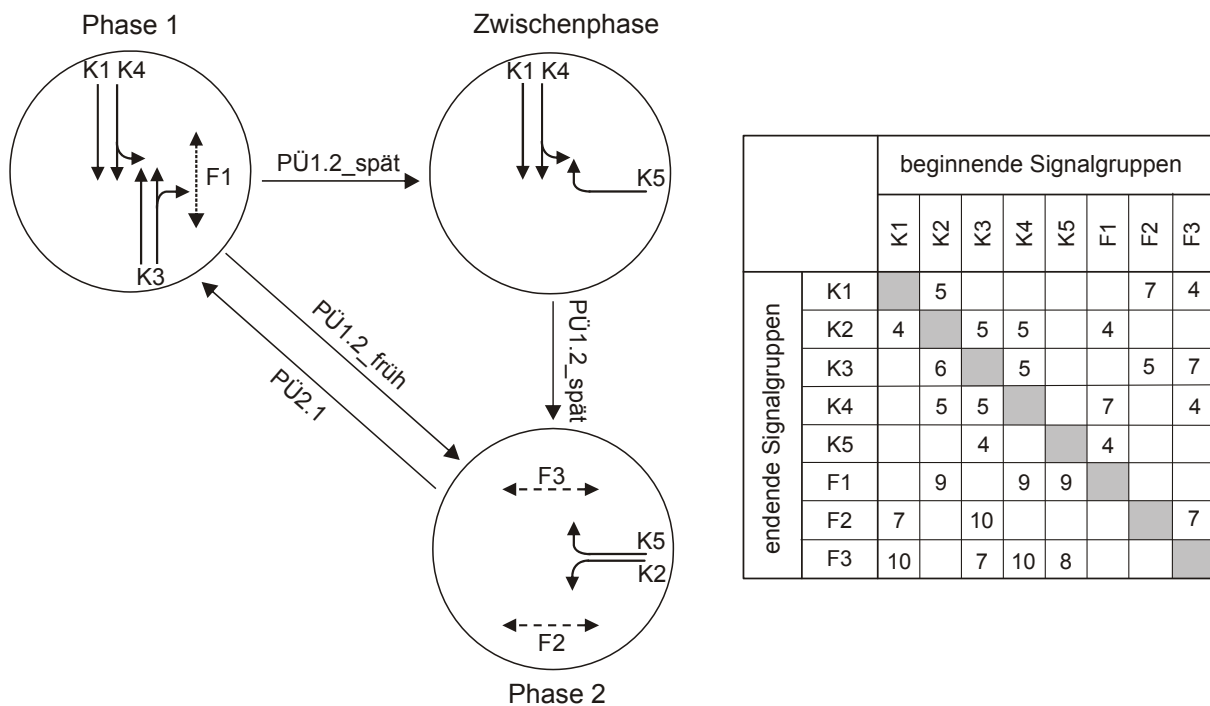
Ein Phasenübergang ist definiert als Zeitdauer zwischen dem Freigabezeitende der zuerst endenden Signalgruppe einer Phase und dem Freigabezeitbeginn der zuletzt startenden Signalgruppe der folgenden Phase.

Wesentlich beeinflusst wird die Dauer des Phasenübergangs von der Größe der Zwischenzeit zweier konkurrierender Ströme. Diese hängen primär von den konkurrierenden Verkehrsarten und der Knotenpunkttopologie ab (vgl. Abschnitt 2.1). Insbesondere die Kombination aus einfahrenden Kraftfahrzeug- und räumenden Fußgängerströmen bedingt hohe Zwischenzeiten mit Dauern von teilweise mehr als 10s.

Das Konzept des Steuerungsverfahrens sieht die Abbildung jedes Phasenübergangs innerhalb der Dauer eines Optimierungshorizonts  $4\Delta t$  vor. Die maximale Länge eines Phasenübergangs beträgt folglich 20s. Die Anzahl an möglichen Phasenübergängen ist dabei nicht beschränkt. Im Rahmen der vorgelegten Arbeit werden für jeden Phasenübergang jeweils zwei Varianten konzipiert. Die Varianten werden hinsichtlich ihres zeitlichen Beginns nach einem „frühen“ und einem „späten“ Phasenübergang unterschieden. In der Regel können die nach den RiLSA (FGSV, 2007) geforderten Mindestfreigabezeiten bereits innerhalb des Optimierungshorizontes sichergestellt werden.

Abbildung 34 zeigt eine Auswahl zulässiger Phasenübergänge für eine 2-Phasensteuerung eines dreiarmligen Knotenpunkts. Die Dauer für den dargestellten frühen Übergang von Phase 1 nach Phase 2 (PÜ1.2\_früh) sowie für die beiden Varianten von 2 nach 1 (PÜ2.1\_früh, PÜ2.1\_spät) betragen in diesem Beispiel einheitlich 10s. Die resultierenden Restzeiten bis zum Ende des Optimierungshorizonts von 5 bzw. 10s dienen als Mindestfreigabezeiten für die neu beginnende Phase. Im Falle eines solchen frühen Phasenübergangs wäre es vorstellbar, den Optimierungshorizont zu verkürzen und das nächste Optimierungsintervall unmittelbar nach Beendigung des Phasenübergangs und der Mindestfreigabezeit (FGSV, 2007) zur Sekunde 15 beginnen zu lassen. Dies hätte zur Folge, dass die Optimierungshorizonte entsprechend unterschiedlicher Zwischenzeiten lokal variieren würden. Aus Gründen der Komplexität wurden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich gleichartige Optimierungshorizonte identischer zeitlicher Dauern betrachtet. Eine einheitliche Reduzierung der Horizontdauer auf 15s würde die Anzahl der möglichen Varianten signifikant einschränken und sollte nur bei Einschränkungen der Kommunikationsreichweite vorgenommen werden. Daher wird ein Optimierungshorizont von 20s als sinnvoll erachtet.

Der in Abbildung 34 dargestellte späte Übergang von Phase 1 nach 2 (PÜ1.2\_spät) zeigt beispielhaft den Einschub einer Zwischenphase, dessen Dauer sich über die gesamte Länge des Optimierungshorizonts erstreckt. Äquivalent dazu können auch Freigabezeitverlängerungen für einzelne Ströme innerhalb eines Optimierungshorizonts abgebildet werden. Die Sicherstellung der Mindestfreigabezeit für Phase 2 erfolgt hier nicht innerhalb des Optimierungshorizonts, sondern im nachfolgenden Optimierungsintervall. Alle Varianten an Phasenübergängen sind planerisch im Vorhinein zu konzipieren und innerhalb des lokalen Wirkungs- und Steuerungsmodells zu implementieren.



**Abbildung 34: Darstellung möglicher Varianten für Phasenübergänge innerhalb einer 2-Phasensteuerung. Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich ihres zeitlichen Beginns.**

### 5.5.2.3 Priorisierungs- und Koordinierungsstrategien

Priorisierungsanforderungen von Einsatzfahrzeugen mit Hoheitsrechten (Sondereinsatzfahrzeuge) oder ÖPNV-Fahrzeuge stellen im Verkehrsablauf seltene Ereignisse dar, auf die umgehend reagiert werden muss, um das Fahrzeug ungehindert den Knotenpunkt passieren zu lassen (FRIEDRICH, 1999).

Nähert sich ein kommunikationsfähiges Sondereinsatzfahrzeug einer RSU, wird dessen Präsenz in der Zufahrt durch einen Zusatz im Kommunikationsprotokoll innerhalb des Steuerungsverfahrens erkannt. Mit Hilfe eines stark überhöhten Gewichtungsfaktors  $g_i$  erfolgt die Priorisierung. Das einzelne Sondereinsatz- bzw. ÖPNV-Fahrzeug wird so als eine Vielzahl sich nähernder Fahrzeuge innerhalb des Steuerungsverfahrens interpretiert. Entsprechend des gewählten Gewichtungsfaktors  $g_i$  ist die Servicerate der zu priorisierenden Phase künstlich zu erhöhen, damit die Lösung der Zielfunktion zu einem frühen möglichen Phasenwechsel führt. Eine Modifizierung des beschriebenen Steuerungsverfahrens bzw. ein Einschub von Sonderphasen ist nicht notwendig.

Mit der Einführung des Gewichtungsfaktors sind zudem Koordinierungsstrategien für benachbarte Knotenpunkte umsetzbar. Dabei erfolgt die Koordination nicht in bekannter Weise anhand von definierten Versatzzeiten, sondern ebenfalls durch die Definition von Gewichtungsfaktoren für Hauptströme oder größere Fahrzeuggruppen innerhalb der Hauptstromrichtung. Die Umsetzung der Koordinierungsstrategie innerhalb des Steuerungsverfahrens erfolgt in Abhängigkeit der Ausstattungsrate. Im idealen Fall von hohen Ausstattungsraten ist es möglich, die sich nähernden Fahrzeuggruppen von den benachbarten Knotenpunkten anhand der Anzahl kommunizierter Fahrzeug-IDs als Pulks eindeutig zu identifizieren. Die Priorisierung der Pulks erfolgt dann analog der bereits beschriebenen Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen.

In Szenarios mit geringen bis mittleren Ausstattungsraten können Pulks nicht mehr zuverlässig detektiert werden. Hier erfolgt die gewünschte Priorisierung anhand von Gewichtungsfaktoren, die global für die Hauptstromrichtung definiert werden. Wesentlicher Vorteil der Pulkpriorisierung gegenüber der Bevorrechtigung der gesamten Hauptstromrichtung ist die gewünschte Erzeugung und Aufrechterhaltung von Pulks. Nur die Abfertigung von großen Fahrzeuggruppen anstelle von einzelnen, zeitlich versetzten Fahrzeugen ermöglicht eine effiziente Nutzung der Freigabezeiten innerhalb eines Optimierungshorizonts.

Existiert eine Priorisierungsanforderung eines Sondereinsatz-, ÖPNV-Fahrzeugs oder Pulks mit mehreren kommunikationsfähigen Fahrzeugen in Hauptstromrichtung erfolgt die Bedienung entweder durch

- die Verkürzung bzw. den Abbruch der aktuellen Phase unter Beachtung der minimalen Freigabezeit nach den RiLSA (FGSV, 2007) und Bedienung der zu priorisierenden Phase oder
- durch die Verlängerung der aktuellen Freigabezeit, bis das Sonderfahrzeug die Haltlinie passieren konnte.

Die Priorisierung auf Basis gewählter Gewichtungsfaktoren eröffnet eine freie Skalierbarkeit des Maßes an Bevorrechtigung von ÖPNV-Fahrzeugen. Koordinierungs- und Priorisierungsstrategien können so miteinander kombiniert werden.

### 5.5.3 Lokales Steuerungsmodell

Kern des lokalen Steuerungsmodells ist eine Ablauflogik, dessen Struktur einer regelbasierten Steuerung ähnelt. Innerhalb der Logik werden planerische Vorgaben, wie die Einhaltung von Mindestfreigabe- und maximalen Wartezeiten, anhand von Bedingungen und Regeln sichergestellt. Erst nach Prüfung dieser Vorgaben erfolgt die Umsetzung der im Wirkungsmodell gefundenen optimalen Lösung im Steuergerät.

Für die Gewährleistung der Stabilität in vermaschten Netzwerken mit ausgeprägten Hauptrichtungen ist neben dem Monitoring maximaler Wartezeiten die Bemessung von Freigabezeiten wichtig, die zusammen mit den weiteren Prozessen innerhalb des lokalen Steuerungsmodells im Folgenden dargestellt werden.

#### 5.5.3.1 Bedarfsgerechte Bemessung von Freigabezeiten

Der in Abschnitt 5.5.2.1 beschriebene Steuerungsablauf ist so konzipiert, dass er sich flexibel und automatisch verschiedenen Verkehrsnachfragesituationen anpassen kann. Innerhalb des vollständig enumerierten Lösungsraums wird diejenige Lösung ausgewählt, die zu einer minimalen Gesamtstückstaulänge am Knotenpunkt führt. Die bereits verstrichenen Freigabe- bzw. Sperrzeiten aus vorherigen Optimierungsintervallen bleiben hier unberücksichtigt. Insbesondere an Knotenpunkten mit einem ausgeprägten Hauptstrom kann diese Nichtberücksichtigung zu schnell anwachsenden Rückstaulängen in Nebenströmen führen.

Für die Konzipierung einer sinnvollen und bedarfsgerechten Freigabezeitbemessung werden daher verschiedene Strategien diskutiert:

- Vollständige Leerung jeder Warteschlange („Clearing Policy“) und
- Keine Bemessung der Freigabezeit.

Die innerhalb des Optimierungshorizonts prognostizierten Rückstaulängen in jeder Phase  $n_{i,4\Delta t}$  und die angenommenen Serviceraten  $s_{i,\Delta t}$  ermöglichen eine genaue Bestimmung der Freigabezeit, die eine Warteschlange benötigt, um vollständig geleert zu werden. Die Anwendung der damit möglichen Clearing Policy bedingt allerdings einen erhöhten Anteil an Zeitintervallen, in denen keine Optimierung zulässig ist, sondern für eine vollständige Leerung von einer oder mehreren Warteschlangen in Anspruch genommen wird. Die hiermit verbundene Einschränkung in der Flexibilität des Steuerungsverfahrens lässt eine Erhöhung der Gesamtwarezeiten und Anzahl an Anfahrvorgängen am betrachteten Knotenpunkt erwarten.

Keine Bemessung der Freigabezeiten würde auch an stark ausgelasteten Knotenpunkten mit konkurrierenden Hauptströmen zu einer ungewünschten lokalen Instabilität führen. Geringe Differenzen in den prognostizierten Warteschlangen würden zu einem Phasenübergang in nahezu jedem Optimierungshorizont führen. Die Freigabezeiten entsprächen den Mindestfreigabezeiten von jeweils 5s. Analog zur Clearing-Policy wäre die Folge ein unerwünschtes Anwachsen der Gesamtstückstaulänge und eine erhöhte Anzahl an Anfahr- und Abbremsvorgängen.

Vor diesem Hintergrund erfolgt die Bemessung der Freigabezeiten bedarfsgerecht für jeden Gesamtknotenpunkt mit einer abgeschwächten Clearing Policy. Die Modifikation sieht vor, dass die Warteschlangen nicht vollständig, sondern nur bis zu einer definierten Obergrenze, garantiert geleert werden. Die obere Schranke wird im Rahmen dieser Arbeit zu  $3\Delta t$  gewählt. Daraus

ergibt sich eine maximal garantierte Freigabezeit von 15s. Zwischen der unteren und oberen Grenze werden die garantierten Freigabezeiten als Vielfaches von  $\Delta t$  bemessen zu:

$$t_{gi} = \frac{n_{i,4\Delta t}}{s_{i,\Delta t}} \cdot \Delta t \Rightarrow x_{i,\Delta t} = 1 \quad (25)$$

mit:

$t_{gi}$ :	Bemessene Freigabezeit
$n_{i,4\Delta t}$ :	Rückstaulänge nach $4\Delta t$
$s_{i,\Delta t}$ :	Servicerate innerhalb $4\Delta t$
$x_{i,\Delta t}$ :	Signalzustand innerhalb $4\Delta t$

Die untere Schranke entspricht der Mindestfreigabezeit. Erst nach Beendigung der garantierten Freigabezeit folgt das nächste Optimierungsintervall (vgl. Abschnitt 5.2)

### 5.5.3.2 Monitoring maximaler Wartezeiten

Die Verwendung von Daten haltliniennaher Detektoren sowie fahrzeuggenerierter Kommunikationsdaten ermöglicht eine laufende Protokollierung und Überwachung von Wartezeiten für das erste Fahrzeug in jeder Verkehrsbeziehung bzw. Phase. Im Rahmen eines Qualitätsmanagements ist insbesondere das Monitoring der Wartezeiten von Nebenströmen ein hilfreiches Instrument. Innerhalb des vorgelegten Steuerungsverfahrens wird so sichergestellt, dass die Wartezeiten in jedem Strom kein unzumutbares Maß überschreiten.

Die Beurteilung bzw. Bemessung von zumutbaren maximalen Wartezeiten orientiert sich am Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) (FGSV, 2005). Hier werden anhand der Kenngröße *zulässige mittlere Wartezeit* sechs Qualitätsstufen für den Verkehrsablauf innerhalb signalisierter Knotenpunkte (QSV) von A (Wartezeiten sehr kurz) bis F (Nachfrage größer als die Kapazität) definiert.

Als maximal zulässige individuelle Wartezeit des ersten Fahrzeugs in einer Warteschlange bzw. in Phase i  $\max t_{wi}$  wird im Rahmen des vorgelegten Steuerungsverfahrens der untere Bereich der QSV D mit einer mittleren Wartezeit von 70s gewählt:

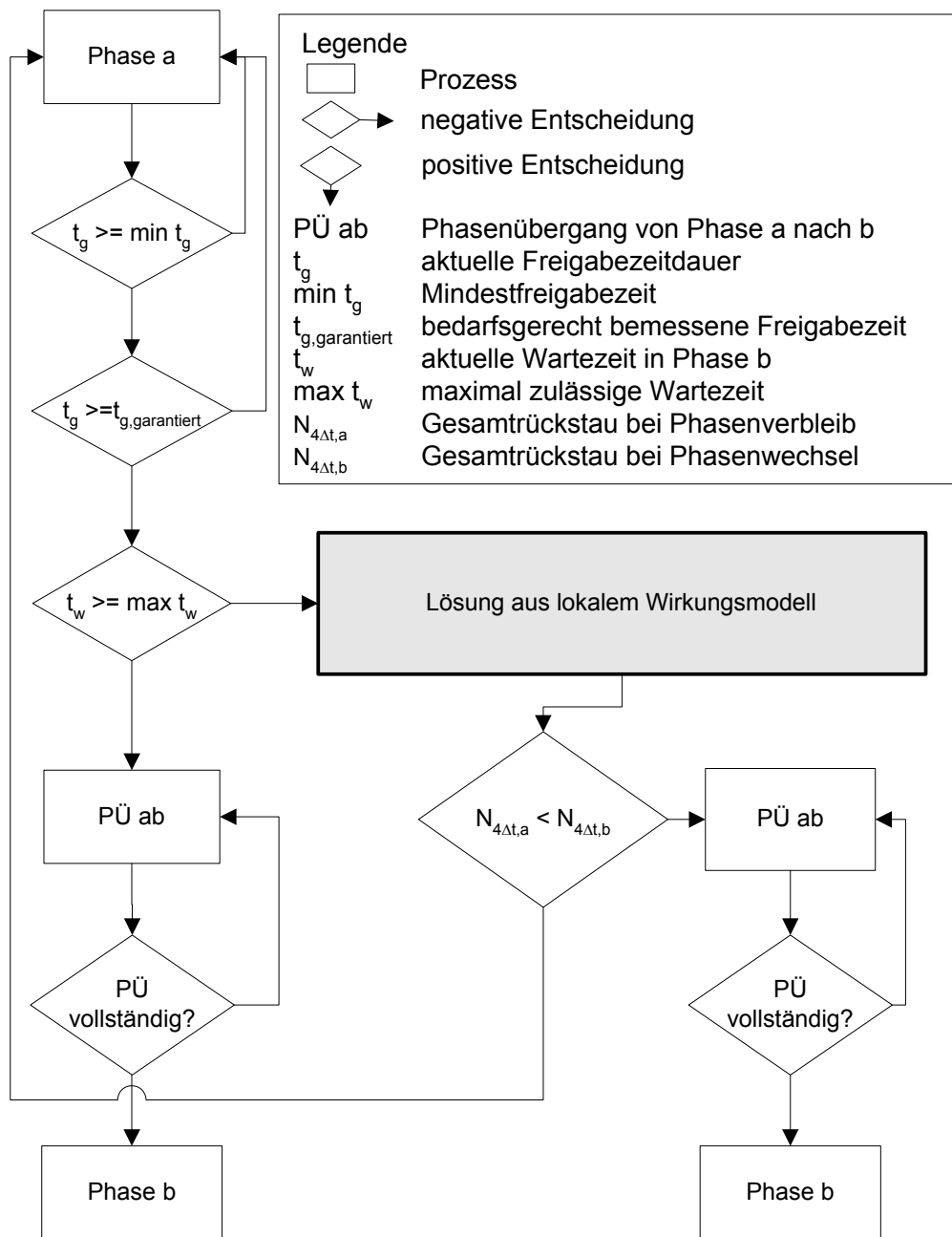
$$\max t_{wi} = 70s$$

Bei Überschreitung der maximalen individuellen Wartezeit des ersten Fahrzeugs in einer Warteschlange bzw. in einer Phase i, wird zum frühestmöglichen Zeitpunkt die aktuelle Phase abgebrochen und der entsprechende (Neben-)Strom signaltechnisch bedient.

### 5.5.3.3 Ablauflogik

Abschließend wird die zeitliche Abfolge der einzelnen Bausteine des lokalen Steuerungsmodells in Abbildung 35 zusammengefasst, welches zu Beginn jedes Optimierungsintervalls  $\Delta t$  aufgerufen wird (vgl. auch Abbildung 19).

Das vereinfachte Beispiel zeigt das Ablaufschema für eine 2-Phasensteuerung mit den Phasen a und b. Es wird angenommen, dass Phase a momentan eine Freigabe erhält.



**Abbildung 35: Schematische Darstellung der Prozesse innerhalb des lokalen Steuerungsmodells anhand einer 2-Phasensteuerung (Phasen a und b)**



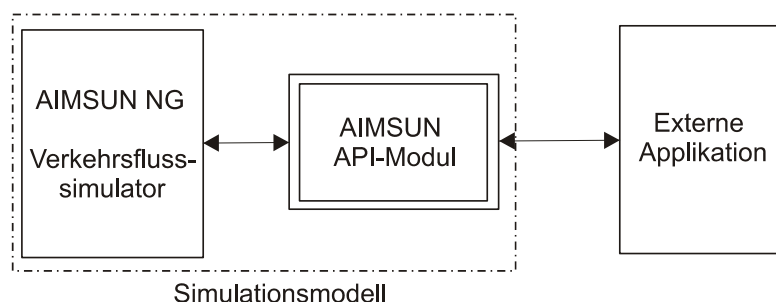
## 6 Testumgebung

### 6.1 Simulationsmodell

Der Zeitpunkt der Markteinführung einer standardisierten Kommunikationstechnologie für Fahrzeug und Infrastruktur ist derzeit nicht prognostizierbar. Eine Reihe nationaler und internationaler Forschungsprojekte sowie das C2CC befassen sich derzeit mit den technischen und administrativen Rahmenbedingungen für eine solche Markteinführung. Für die Überprüfung der Funktionalität und Quantifizierung der Güte der vorgestellten dezentralen Netzsteuerung, insbesondere unter Berücksichtigung verschiedener Ausstattungsraten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen, wurde daher ein mikroskopisches Simulationstool als Wirkungsmodell genutzt, welches im Folgenden erläutert wird.

Kern des Simulationsmodells ist der mikroskopische Verkehrsflusssimulator AIMSUN NG (TSS, 2007). Wesentlicher Vorteil dieses Simulators gegenüber anderen Produkten ist seine definierte offene Schnittstelle (API-Modul), die es ermöglicht, externe Applikationen mit dem Verkehrsflusssimulator zu kombinieren. So können zu jedem Simulationsschritt zum einen interne Daten über Fahrzeuge, Steuerungsstrategien und Detektoren vom Verkehrsflusssimulator innerhalb des API-Moduls ausgelesen werden und zum anderen extern generierte Steuerungsstrategien (z.B. Schaltbefehle, Fahrstreifensperrungen, etc.) im Verkehrsflusssimulator umgesetzt werden. Entsprechend des Informationsflusses befindet sich das API-Modul zwischen Verkehrsflusssimulator und externen Applikationen (Abbildung 36).

Für die Simulationsuntersuchungen wurde ein handelsüblicher Pentium 4-Prozessor (3,20 GHz, 2,99 GB RAM) verwendet.



**Abbildung 36: Simulationsumgebung AIMSUN NG**

## 6.2 Simulationsumfang

### 6.2.1 Testnetz

Für die Simulationsuntersuchungen wurde ein reales Testnetz gewählt, welches folgende typische Eigenschaften städtischer Stadtteilnetze aufweist:

- Existenz von Hauptrouten,
- Koordinierungen von signalisierten Knotenpunkten innerhalb von Streckenzügen,
- Netzmaschen,
- Unterschiedliche Knotenpunktabstände und
- Existenz von linearen und nicht-linearen Zufahrtsverläufen.

Gewählt wurde das real existierende Stadtteilnetz Hannover-Südstadt. Das in Abbildung 37 dargestellte Netz befindet sich südöstlich der hannoverschen Innenstadt und wird im Westen durch den Maschsee, im Norden durch den Aegidientorplatz, im Osten durch die Lindemannallee und im Süden durch den Südschnellweg begrenzt.

Im Rahmen der Simulationsuntersuchungen wurden alle Hauptverkehrsstraßen sowie eine Auswahl der wichtigsten Erschließungsstraßen modelliert. Die Kantenlänge beträgt insgesamt ca. 19km, wobei sich 15% aller Kanten innerhalb von Tempo-30-Zonen befinden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf allen weiteren Kanten ist auf 50km/h begrenzt. Es werden neun signalisierte und sechs vorfahrtsgeregelte Knotenpunkte modelliert, deren Abstände zwischen einer minimalen Länge von ca. 100m und einer maximalen Länge von ca. 385m variieren.

Mit den Straßenzügen Rudolf-von-Bennigsen-Ufer (siehe Abbildung 37: Knotenpunkte 403-402) und Hildesheimer Straße (423-422-421) existieren zwei Hauptradiale in Süd-Nord-Richtung, die insbesondere in der morgendlichen und abendlichen Hauptverkehrszeit eine wichtige Verbindung zwischen dem Fernstraßennetz bzw. den südlichen Stadtteilen und dem Cityring der Innenstadt darstellen. In Ost-West Richtung verläuft zudem der Straßenzug Altenbekener Damm (452-451-423-412), der eine wichtige Zubringerfunktion für die beiden genannten Hauptradialen bildet.

In der realen Welt wird der überwiegende Teil der signalisierten Knotenpunkte verkehrsabhängig gesteuert. Die Anzahl an Phasen beträgt maximal drei. Primärer Grund für die Verwendung einer verkehrsabhängigen Steuerung ist hier die Möglichkeit einer Priorisierung für ÖPNV-Fahrzeuge (in diesem Fall Busse). Innerhalb der Landeshauptstadt Hannover wird eine (politisch gewollte) stringente Bevorrechtigungsstrategie für ÖPNV-Fahrzeuge gewählt, die allerdings zu Beeinträchtigungen im Verkehrsablauf des MIV führen, da planerisch festgelegte Koordinierungsmaßnahmen durch den Einschub von Sonderphasen teilweise unberücksichtigt bleiben. Innerhalb der vorgelegten Arbeit wird daher auf eine Modellierung der ÖPNV-Priorisierung verzichtet und stattdessen eine für den MIV optimierte Netzsteuerung als Referenzsteuerung gewählt (vgl. Abschnitt 6.2.4.1).

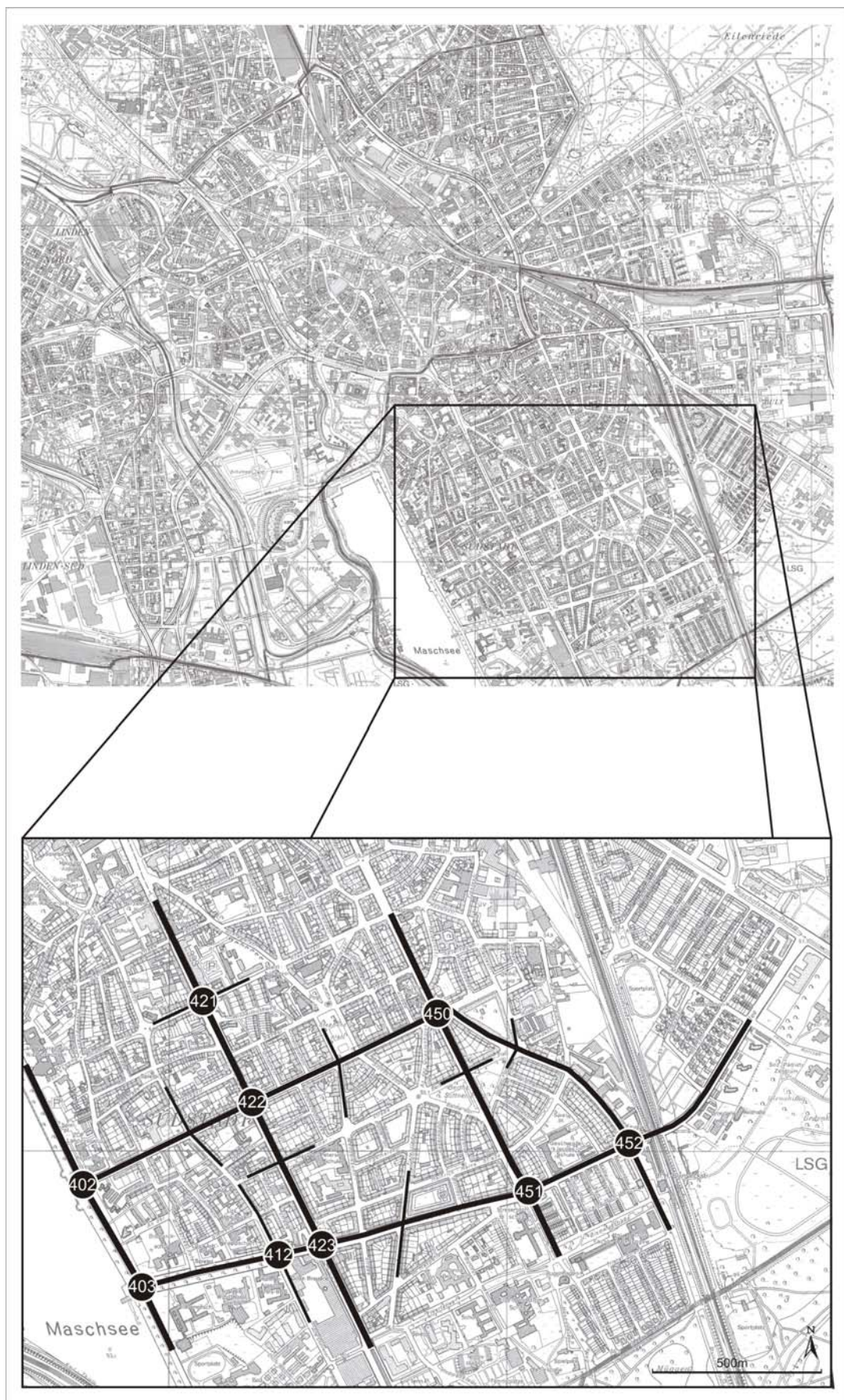


Abbildung 37: Darstellung des Testnetzes Hannover - Südstadt

### 6.2.2 Verkehrsnachfrage

Die Basis der Verkehrsnachfragemodellierung bildet die Verkehrsnachfragematrix des VISUM-Netzmodells der Landeshauptstadt Hannover für das Jahr 2007 (FRIEDRICH, SCHMIDT, 2009). Für das Testnetz Hannover-Südstadt wurde auf Basis dieser Matrix sowie aktuellen Knotenstromzählungen an ausgewählten signalisierten Knotenpunkten in der morgendlichen Hauptverkehrszeit eine semi-fiktive Quelle-Ziel-Matrix (OD-Matrix) für das Testnetz erstellt. Die Spalten- und Zeilensumme beträgt jeweils 5868Fz/h.

Für jede OD-Beziehung wurden maximal zwei Routen festgelegt, die jeder Verkehrsteilnehmer unabhängig von der augenblicklichen Verkehrsnachfrage im Netz zwingend einhält. Das Routenwahlmodell von AIMSUN NG wurde damit deaktiviert. Nur auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die erwarteten Knotenstrombelastungen den im Referenzszenario modellierten entsprechen (vgl. Abschnitt 6.2.6). Die festgelegten Routen entsprechen den zeit- und wegekürzesten Verbindungen für jede OD-Beziehung.

Im Rahmen der Simulationsuntersuchungen wurde ausschließlich die Fahrzeugklasse Pkw modelliert. Weitere Klassen des MIV sowie ÖPNV- und Sonderfahrzeuge wurden nicht betrachtet. Primärer Grund hierfür ist die nicht gegebene Möglichkeit von Priorisierungsstrategien in der gewählten Referenzsteuerung (vgl. Abschnitt 6.2.4).

### 6.2.3 Modellierung des Verkehrsflusses innerhalb signalisierter Knotenpunkte

Die mikroskopische Simulation vom innerstädtischen Verkehr bedingt insbesondere die realitätsnahe Abbildung von Bewegungsprozessen innerhalb signalisierter Knotenpunkte. Die Parameter für das Längs- und Querverhalten der einzelnen Fahrzeuge mit den entsprechenden Beschleunigungs- und Bremsvorgaben werden im Folgenden dargestellt.

Die Modellierung des Abbrems- und insbesondere des Anfahrverhaltens innerhalb signalisierter Zufahrten gliedert sich in fahrzeugbezogene und fahrerbezogene Parameter. Während fahrzeugbezogene Parameter wie das Beschleunigungs- und Verzögerungsvermögen gut beschrieben werden können, ist die Bestimmung fahrerspezifischer Parameter (Reaktionszeiten) diffizil. HOFFMANN (1989) bemerkt hierzu „(es) bestehen bei der Beschreibung der fahrerbezogenen Größen (z.B. Reaktionszeit, Sensitivitätsfaktor) weitaus größere Schwierigkeiten, da diese psychologische und physiologische Indikatoren aufweisen und von zahlreichen, z.T. nicht näher ergründenden Faktoren beeinflusst werden.“

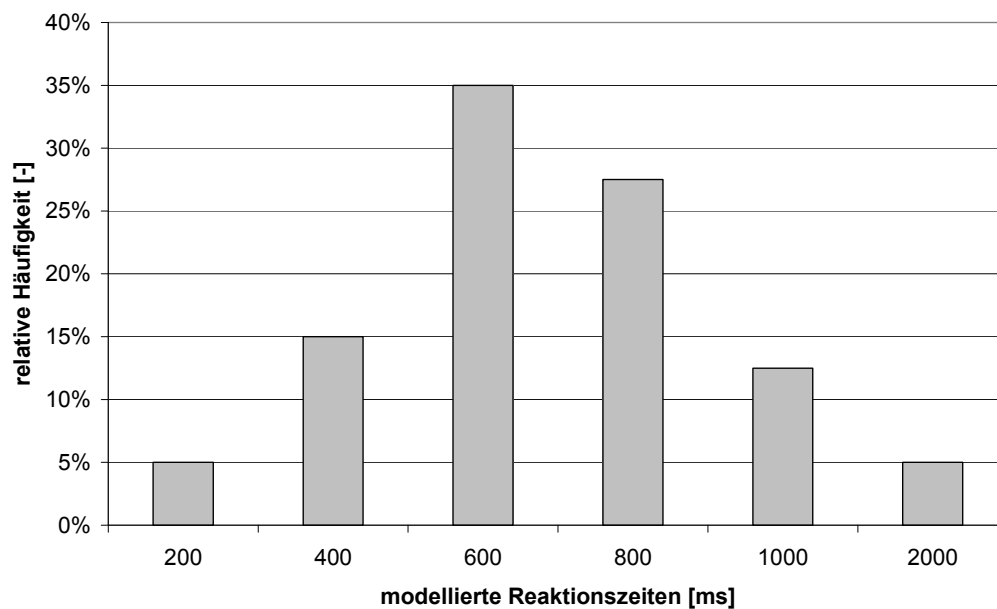
Innerhalb des Verkehrsflusssimulators AIMSUN NG werden die relevanten fahrzeugbezogenen Parameter maximale Beschleunigung sowie normale und maximale Bremsverzögerung mit den statistischen Kenngrößen arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung sowie Minima und Maxima eingestellt. Für ein realistisches Modell werden zudem die Fahrzeuglänge und der Abstand der einzelnen Fahrzeuge innerhalb der Warteschlangen anhand von empirischen Daten gewählt. Tabelle 2 zeigt die im Verkehrsflusssimulator als globale Parameter verwendeten Kenngrößen mit den entsprechenden Referenzuntersuchungen.

Wesentlichen Einfluss auf die Stauauflösung hat neben dem Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge die Reaktionszeit der Fahrzeugführer. DERICHS (1998) konnte im Rahmen umfangreicher empirischer Untersuchungen Häufigkeitsverteilungen für Reaktionszeiten ermitteln. Innerhalb von AIMSUN NG werden diese Reaktionszeiten in Form einer Häufigkeitsverteilung als Vielfaches des gewählten Simulationsschritts eingespeist.

Abbildung 38 zeigt die Häufigkeitsverteilung der gewählten Reaktionszeiten mit einer am Simulationsschritt orientierten Klassenbreite von 200ms.

**Tabelle 2: Gewählte Parameter für die Modellierung des Verkehrsflusses (Typ Pkw)**

Parameter	Statistik				Referenz
	Mittelwert	Standardabw.	Min	Max	
Fahrzeuglänge [m]	4,74	0,40	2,50	5,20	(FGSV, 2001)
Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	50,00	10,00	40,00	60,00	-
Maximale Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	2,19	0,42	1,40	3,97	(RICHTER, 2005)
Normale Verzögerung [m/s <sup>2</sup> ]	2,25	0,49	1,42	3,97	(RICHTER, 2005)
Maximale Verzögerung [m/s <sup>2</sup> ]	9,17	0,74	6,33	11,45	(RICHTER, 2005)
Minimaler Abstand [m]	2,00	0,77	1,90	2,10	(HOFFMANN, NIELSEN, 1994)



**Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung der modellierten Reaktionszeiten (DERICHS, 1998)**

### 6.2.4 Lichtsignalsteuerungen

Basis der Konzipierung von Phasen und Phasenübergängen für jeden der neun signalisierten Knotenpunkte im betrachteten Netz Hannover-Südstadt sind die Planungsunterlagen der Landeshauptstadt Hannover. So werden real existierende planerische Vorgaben wie einzuhaltende Zwischen- und Mindestfreigabezeiten sowohl innerhalb des entwickelten dezentralen Steuerungsverfahrens als auch innerhalb des Referenzszenarios berücksichtigt.

#### 6.2.4.1 Referenzsteuerung

Bei der Bewertung eines neu entwickelten Steuerungsverfahrens im Modell stehen in der Regel das existierende Steuerungsverfahren im betrachteten Testnetz (Ist-Zustand) oder ein weltweit anerkanntes Verfahren als Referenz zur Wahl. Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift wurde das weltweit anerkannte offline basierte Netzsteuerungsverfahren TRANSYT-7F Version 10.2 (vgl. Abschnitt 2.3) als Referenz gewählt<sup>7</sup>. Die im Stadtteilnetz Hannover-Südstadt existierende regelbasierte Knotenpunktssteuerung wurde aufgrund der stringenten Priorisierung für ÖPNV-Fahrzeuge zu Lasten des MIV dagegen nicht betrachtet (vgl. Abschnitt 6.2.1).

Eingangsdaten für die zu optimierenden Festzeitsteuerungen mit TRANSYT-7F sind die existierenden Festzeitprogramme für die morgendliche Hauptverkehrszeit gemäß den aktuellen Planungsunterlagen der Landeshauptstadt Hannover. Die Umlaufzeit beträgt für alle Signalprogramme einheitlich 90s. Der überwiegende Anteil der betrachteten neun signalisierten Knotenpunkte wird mit einem 2-Phasenprogramm gesteuert. Lediglich der Knotenpunkt Hildesheimer Straße/ Altenbekener Damm (vgl. Abbildung 37, Knotenpunkt 423) operiert mit einer 3-Phasensteuerung.

Das zu modellierende Verkehrsnetz wird als Knoten-Kanten Modell in TRANSYT-7F dargestellt (Abbildung 39). Zu- und Abflüsse aus vorfahrtsgeregelten Knotenpunkten an Erschließungsstraßen mit geringer Verkehrsnachfrage werden mit Hilfe von „Kantenzuflüssen“ berücksichtigt. Die Optimierung der Festzeitprogramme für jeden einzelnen Knotenpunkt im Netz wurde auf Basis der empirisch ermittelten OD-Matrix und Knotenstromzählungen für die morgendliche Spitzenstunde zwischen 07:30-08:30 Uhr durchgeführt. Anhang A 2 enthält die in TRANSYT-7F hinterlegten Knotenströme.

Die in Abbildung 39 hervorgehobenen Kanten repräsentieren die drei real existierenden koordinierten Streckenzüge gemäß Abschnitt 6.2.1. Die Koordinierung der entsprechenden Knotenpunkte wird in TRANSYT-7F im Rahmen definierter Hauptrouten berücksichtigt. Hierzu wird, neben der Gewichtung der einzelnen zu koordinierenden Knotenpunkte, das Verkehrsnachfragemodell jedes Knotenpunkts mit Informationen hinsichtlich relevanter Abbiegeanteile benachbarter Knotenpunkte gespeist.

Für die Optimierung der Festzeitsteuerungen wird die Methode der Genetischen Algorithmen verwendet (vgl. Abschnitt 4.2.2). Optimiert werden die Kenngrößen *Umlaufzeit*, *Freigabezeitanteile* und *Versatzzeiten*. Innerhalb der gewählten Zielfunktion werden die verkehrlichen Parameter *Anzahl an Halten [%]*, *Verlustzeiten im Netz [s/Fz]*, *Reisezeiten [Fz-*

---

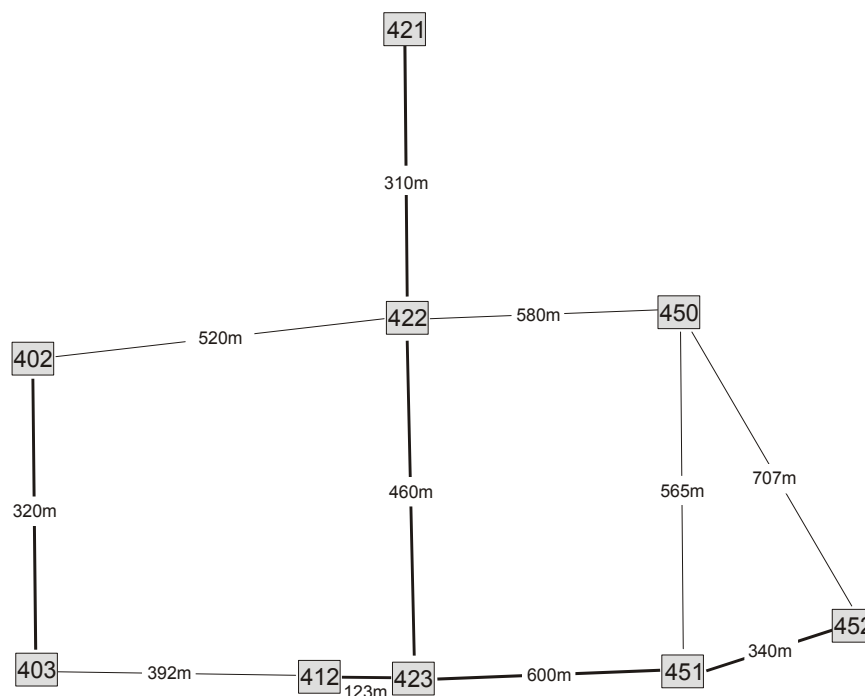
<sup>7</sup> Die Verwendung eines online basierten Netzsteuerungsverfahrens wurde aus Gründen der Verfügbarkeit nicht betrachtet.



$h/h$ ] und *Kraftstoffverbrauch* [ $l/h$ ] minimiert. Tabelle 3 zeigt die gewählten Parameter im Rahmen der Optimierung, die sich nach Erprobung verschiedener Einstellungen als am günstigsten erwiesen haben. Es wird schließlich diejenige Lösung als optimal angenommen, die nach einem definierten Abbruchkriterium die Zielfunktion minimiert.

**Tabelle 3: Parameter für Genetischen Algorithmus (GA) im Referenzszenario**

Parameter für GA	Werte
Wahrscheinlichkeit der Rekombination [%]	30
Wahrscheinlichkeit für Mutationen [%]	1,0
Maximale Anzahl an Generationen [-]	300
Populationsgröße [-]	20
Abbruchkriterium [%]	0,01



**Abbildung 39: Testnetz Hannover-Südstadt als Knoten-Kanten Modell in TRANSYT-7F**

#### 6.2.4.2 Neues Steuerungskonzept

Softwaretechnisch wurde die dezentrale Struktur der Netzsteuerung in Form einer objektorientierten Programmierung umgesetzt. Jede Knotenpunktsteuerung ist dabei als ein eigenes Objekt innerhalb der Programmstruktur definiert und optimiert die jeweilige Steuerung lokal ohne Informationen benachbarter Knotenpunkte.

Innerhalb der vorgelegten Arbeit fungiert das API-Modul äquivalent einer RSU und bildet damit den Kern der Systemarchitektur. So wurden alle in Abbildung 19 dargestellten Applikationen, die sich auf der RSU befinden würden, innerhalb des API-Moduls als Dynamische Bibliothek bzw. Dynamic Link Library (dll) in der Programmiersprache C++ implementiert. Abbildung 40

zeigt den entsprechenden Regelkreis des Steuerungsverfahrens im verwendeten Simulationsmodell. Die einzelnen Prozesse innerhalb des Verkehrsfluss-, Wirkungs- und Steuerungsmodells wurden bereits in Abschnitt 5.5 detailliert erläutert und werden daher im Folgenden nur in Stichpunkten den einzelnen Modellen zugeordnet.

Implementierte Funktionen innerhalb des lokalen Verkehrslagemodells:

- Zuordnung von Kommunikationsdaten zu phasendiskreten Warteschlangen,
- Aggregation und Propagierung von Kommunikationsdaten je Optimierungsintervall  $\Delta t$ ,
- Methode zur Rückstauschätzung anhand von Kommunikationsdaten und
- Aktualisierung phasendiskreter Wartezeiten anhand Daten lokaler Detektoren.

Statische Daten innerhalb des lokalen Verkehrslagemodells:

- Funktionen für die mathematische Beschreibung der Linienverläufe jeder Zufahrt,
- Phasenanzahl und -einteilung,
- Definition der Kommunikationsreichweite und
- Inhalt der Kommunikationsprotokolle.

Implementierte Funktionen innerhalb des lokalen Wirkungsmodells:

- Bestimmung bzw. Prognostizierung der Rückstaulängen je Phase für den Optimierungshorizont  $4\Delta t$  in  $\Delta t$ -diskreten Zeitschritten,
- Vollständige Enumerierung des Lösungsraums,
- Auswahl der optimalen Lösung.

Statische Daten innerhalb des lokalen Wirkungsmodells:

- Definition der Zielfunktion,
- Definition der Serviceraten je Phase und Signalstatus,
- Koordinierungs- und Priorisierungsparameter (Gewichtungsfaktoren) und
- Definition von Phasenübergängen.

Implementierte Funktionen innerhalb des lokalen Steuerungsmodells:

- Bedarfsgerechte Bemessung von Freigabezeiten,
- Monitoring von Wartezeiten,
- Definition von Ablauflogiken und
- Generierung von Schaltbefehlen.

Statische Daten innerhalb des lokalen Steuerungsmodells:

- Definition maximaler Wartezeiten und Mindestfreigabezeiten sowie
- Konzipierung von Phasenübergängen.





Innerhalb des API-Moduls erfolgt die Modellierung der beiden Fahrzeugtypen. Entsprechend der angestrebten Ausstattungsdaten wird zum Zeitpunkt des Fahrzeugeintritts in das Simulationsnetz nur ein bestimmter Anteil der ins Netz eingespeisten Fahrzeuge mit einem bestimmten Merkmal versehen. Informationen von Fahrzeugen mit diesem Kommunikationsmerkmal können zu jedem Simulationsschritt mit Hilfe von definierten Funktionen innerhalb des API-Moduls abgerufen und weiterverarbeitet werden. Die Einspeisung der Fahrzeuge und demzufolge auch die Häufigkeit von kommunikationsfähigen Fahrzeugen auf einzelnen Eintrittskanten im Simulationsnetz folgen einer Poissonverteilung.

Befindet sich ein kommunikationsfähiges Fahrzeug innerhalb der definierten Reichweite von 280m, werden dessen Informationen innerhalb des lokalen Verkehrslagemodells abgerufen und daraus ein lokales Verkehrslagebild generiert. Folgende Daten kommunizierender Fahrzeuge werden ausgewertet (vgl. Abschnitt 5.5.1.1):

- Fahrzeug-ID,
- aktuelle Fahrzeugposition,
- aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und
- ggf. den nächsten Abbiegewunsch bzw. die Route des Fahrzeuges.

Die Phasenkonzeption für die Steuerung der kombinierten Knotenpunkte 412 und 423 bedingt die Übermittlung des nächsten Abbiegewunsches bzw. der Route des Fahrzeuges, da hier eine gesonderte Phase für Linksabbieger eingerichtet ist (vgl. Anhang A 7). An allen weiteren Knotenpunkten erfolgt die Abfertigung der Linksabbieger zusammen mit weiteren Verkehrsströmen als bedingt verträglich. Eine Übermittlung der Route ist demzufolge an diesem Knotenpunkt nicht notwendig.

Auf eine exakte Modellierung der Kommunikation aus Sicht der Nachrichtentechnik wird verzichtet. Es wird vereinfacht angenommen, dass keine Latenzzeiten bei der Übermittlung der Nachrichten entstehen. Die Genauigkeit der übermittelten Positionsdaten entspricht ungefähr einer halben Fahrstreifenbreite von 1,5-2,0m. Größere Positionierungsfehler, die aufgrund von z.B. Abschattungen in der Realität auftreten können, würden innerhalb des Steuerungsverfahrens zu einer Nichtberücksichtigung des entsprechenden gesendeten Protokolls führen, da das sendende Fahrzeug keiner Warteschlange zugeordnet werden kann. Es würde äquivalent einem nicht kommunikationsfähigen Fahrzeug behandelt werden. Fehlerhafte Kommunikationsprotokolle können somit indirekt durch die Berücksichtigung verschiedener Ausstattungsdaten an kommunikationsfähigen Fahrzeugen innerhalb der Simulation berücksichtigt werden.

Folgende Ausstattungsdaten werden modelliert: 10%, 14%, 17%, 20%, 25%, 33%, 50%, 100%.

#### **6.2.6 Modellierte Szenarios**

Für die qualitative Beurteilung des entwickelten dezentralen Steuerungsverfahrens - nachfolgend nach dem verwendeten Optimierungsverfahren mit CE (**C**omplete **E**numeration) bezeichnet - wird es einer mit TRANSYT-7F (T7F) optimierten Festzeitsteuerung gegenüber gestellt.

Folgende Nachfrageszenarios werden betrachtet:

**Nachfrageszenario 1 - Konstante und bekannte Verkehrsnachfrage in der morgendlichen Spitzenstunde:** Die in T7F hinterlegte Verkehrsnachfrage entspricht exakt der in Abschnitt 6.2.2 dargestellten Verkehrsnachfrage für den Zeitraum 07:30-08:30Uhr. Die Einspeisung der Fahrzeuge in das Simulationsnetz erfolgt konstant. Qualitätsverluste für T7F, aufgrund dynamischer Schwankungen in der Verkehrsnachfrage, können somit ausgeschlossen werden. Es liegen damit idealisierte Nachfragebedingungen für T7F vor. Dieses Szenario soll aufzeigen, ob CE einen Mehrnutzen gegenüber einem etablierten Steuerungsverfahren aufweist.

**Nachfrageszenario 2 - Dynamische Schwankungen in der Verkehrsnachfrage:**

Entsprechend den tatsächlich auftretenden dynamischen Schwankungen in der morgendlichen Hauptverkehrszeit in der Landeshauptstadt Hannover wurde die Verkehrsnachfrage in Nachfrageszenario 2 modelliert. Dieses Nachfrageszenario soll Hinweise geben, inwiefern die angestrebte dynamische Anpassung von CE an verschiedene Verkehrsnachfrageszenarios erreicht werden kann.

Die Einspeisung des Verkehrs in das Simulationsnetz erfolgt in 15min-Intervallen als Anteil der verwendeten OD-Matrix (vgl. Abschnitt 6.2.2). Tabelle 4 beinhaltet die verwendeten OD-Matrix Anteile für die zwei definierten Nachfrageszenarios. Ein Anteil von 100% je 1h bzw. 25% je 15min entspricht exakt der in T7F hinterlegten Verkehrsnachfrage. Zu Beginn jedes Nachfrageszenarios dient ein Zeitintervall von 15min (07:15-07:30Uhr) zum „Füllen“ des Netzes mit Fahrzeugen, damit zu Beginn des Simulationszeitraumes (07:30-09:30Uhr) bereits die gewünschten mittleren Verkehrsstärken im Netz vorhanden sind.

Neben der beschriebenen Steuerung CE und der Referenzsteuerung T7F sollen zwei zusätzliche Szenarios Aufschluss darüber geben, welchen tatsächlichen Nutzen die Verwendung von Daten haltliniennaher Detektoren und die Integration der Methode zur Rückstauschätzung innerhalb von CE für den städtischen Verkehrsfluss haben können:

- **Szenario 1:** Referenzszenario T7F (optimierte Festzeitsteuerung)
- **Szenario 2:** CE ohne Rückstauschätzer – ohne Daten haltliniennaher Detektoren
- **Szenario 3:** CE ohne Rückstauschätzer – mit Daten haltliniennaher Detektoren
- **Szenario 4:** CE mit Rückstauschätzer – mit Daten haltliniennaher Detektoren

**Tabelle 4: Modellierte Verkehrsnachfrage**

Modellierte Verkehrsnachfrage	Tageszeit [hh:mm]								
	07:15	07:30	07:45	08:00	08:15	08:30	08:45	09:00	09:15
Nachfrageszenario 1	25%	25%	25%	25%	25%		nicht modelliert		
Nachfrageszenario 2	23%	23%	26%	29%	29%	31%	23%	27%	16%



## 7 Simulationsergebnisse

### 7.1 Bewertungsmethodik

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen für die in Kapitel 6.2.6 definierten Szenarios dargestellt. Jeder gezeigte Datenpunkt repräsentiert das arithmetische Mittel aus 30 Simulationsdurchläufen mit unterschiedlichen Startzufallszahlen. Für die Beurteilung der Güte und Leistungsfähigkeit des entwickelten dezentralen Steuerungsverfahrens CE wurden folgende verkehrliche Kenngrößen betrachtet und den entsprechenden Kenngrößen der Referenzsteuerung gegenübergestellt:

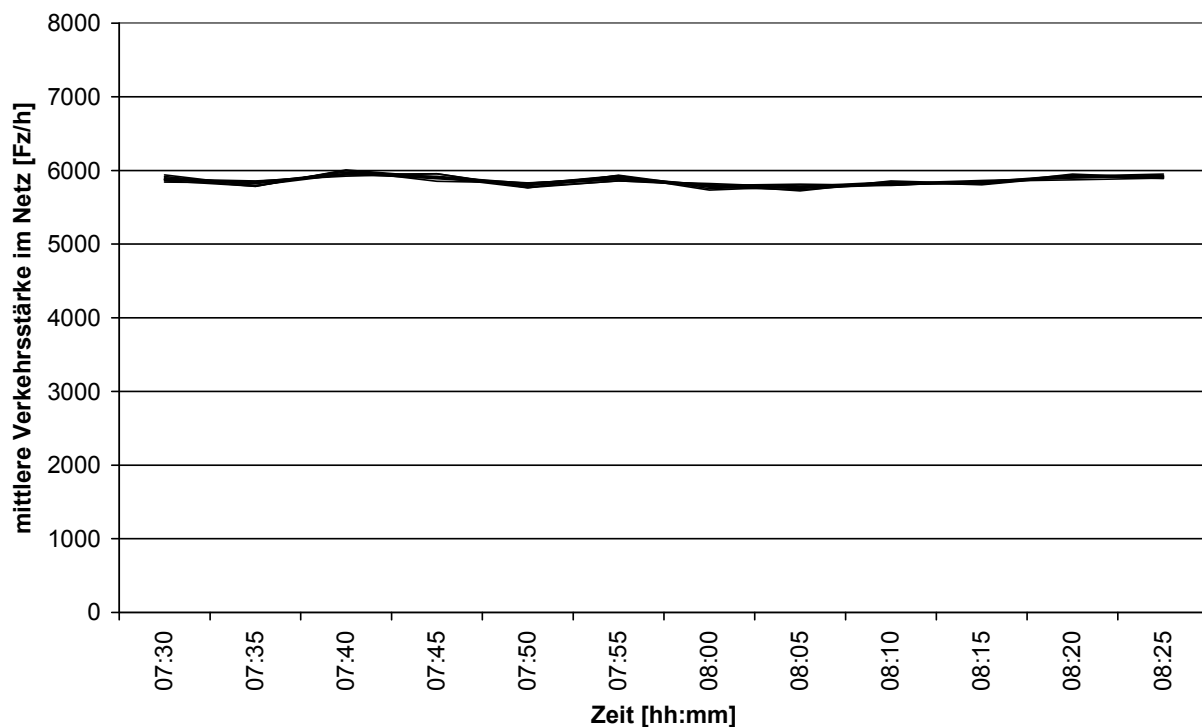
- Verlustzeit [s] = gegenüber der freien Durchfahrt zusätzlich benötigte Zeit
- Haltezeit [s] = Summe von Zeitintervallen aufgrund von Haltevorgängen
- Reisezeit [s] = Aufenthaltsdauer im Netz
- #Halte [#] = Anzahl Halte

Für die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs auf den Haupttrouten (vgl. Abbildung 37) und den Nebenrichtungen wurden neben der netzweiten Betrachtung der verkehrlichen Kenngrößen zudem die Verlustzeiten in jeder Zufahrt gemäß HBS (FGSV, 2005) bewertet.

### 7.2 Nachfrageszenario 1: Konstante Verkehrsnachfrage

Abbildung 41 zeigt die modellierte Verkehrsstärke im Nachfrageszenario 1. Die angestrebte idealisierte Bedingung für T7F in Form einer konstanten und bekannten Verkehrsnachfrage konnte erreicht werden. Die mittlere Verkehrsstärke von ca. 5900Fz/h entspricht der empirisch ermittelten Verkehrsstärke in der morgendlichen Spitzenstunde für das Testnetz Hannover-Südstadt.

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse des Nachfrageszenarios 1 sind differenziert nach einer netzweiten Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs (Abschnitt 7.2.1) und einer zufahrtsfeinen Qualitätsbeurteilung (Abschnitt 7.2.2).



**Abbildung 41: Mittlere Verkehrsstärken im Testnetz Hannover-Südstadt für den Zeitraum 07:30-08:30Uhr(Nachfrageszenario 1)**

### 7.2.1 Netzweite Betrachtung

Abbildung 42 zeigt die mittleren Verlustzeiten je Kilometer im betrachteten Testnetz für die Szenarios 1-4 im Zeitraum 07:30-08:30Uhr. Die gemittelte Verlustzeit entspricht der Differenz zwischen der tatsächlich erreichten und der angestrebten Geschwindigkeit von maximal 60km/h (vgl. Tabelle 2). Die dargestellte gestrichelte Linie repräsentiert die mittlere Verlustzeit von 31s/km im Referenzszenario T7F. Die Abbildung zeigt, dass bei Penetrationsraten  $p \geq 25\%$  CE mit Rückstauschätzer und Verwendung haltliniennaher Detektoren (nachfolgend *CE\_mit\_mit*) zu einer Reduzierung der mittleren Verlustzeiten je Kilometer beiträgt. Trotz idealisierter Bedingungen für T7F können Reduzierungen der mittleren Verlustzeiten um bis zu 5s/km bzw. ca. 15% in allen CE ( $p=100\%$ ) erreicht werden.

Erwartungsgemäß wird die Leistungsfähigkeit von CE maßgeblich von der Penetrationsrate an kommunikationsfähigen Fahrzeugen bestimmt. Während bei Penetrationsraten  $p \geq 25\%$  eine leichte Reduzierung der mittleren Verlustzeit durch *CE\_mit\_mit* gegenüber T7F erreicht werden kann, sind die mittleren Verlustzeiten bei einer Penetrationsrate  $20\% < p < 25\%$  nahezu identisch zum Referenzszenario. Bei geringeren Penetrationsraten  $p \leq 20\%$  sinkt die Leistungsfähigkeit von *CE\_mit\_mit* unter das Niveau der Referenzsteuerung.

Der Vergleich der mittleren Verlustzeiten in den Szenarios 2-4 untereinander zeigt den Nutzen der Verwendung haltliniennaher Detektoren und der Methode zur Rückstauschätzung. Die mittleren Verlustzeiten im Szenario 2 *CE ohne haltliniennahe Detektoren und ohne Rückstauschätzer* (nachfolgend *CE\_ohne\_ohne*) zeigen einen deutlichen Qualitätsverlust im Zuge sin-

kender Penetrationsraten. Bereits bei  $p=50\%$  sind die mittleren Verlustzeiten höher als im Szenario 4 *CE\_mit\_mit* und erreichen eine maximale Differenz von ca. 40% bei  $p=10\%$ . Der Qualitätsabfall zwischen  $p=100\%$  und  $p=10\%$  ist mit ca. 60% im Szenario *CE\_ohne\_ohne* deutlich höher als im Szenario *CE\_mit\_mit* (ca. 30%). Lediglich ab  $p>50\%$  kann das Niveau von *CE\_mit\_mit* nahezu erreicht werden.

Auffällig ist eine deutliche Zunahme der mittleren Verlustzeiten im Netz ab einer Penetrationsrate von  $p<14\%$  in allen CE-Szenarios. Es ist zu vermuten, dass bei sehr geringen Ausstattungsraten die Verkehrsnachfrage in den Zufahrten nicht mehr ausreichend im Rahmen von CE abgeschätzt werden kann. Insbesondere in untergeordneten Strömen sinkt bei geringen Penetrationsraten die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrzeuge mit OBUs die Kommunikationsreichweite erreichen, ehe die entsprechenden Zufahrten mit nicht-kommunikationsfähigen Fahrzeugen überstaut sind. Die Folge sind Rückstaus in benachbarte Knotenpunkte, die zu einem netzweiten Verkehrszusammenbruch führen können. Die Analyse der mittleren Verlustzeiten einzelner Zufahrten in Abschnitt 7.2.2 bestätigt diese Vermutung.

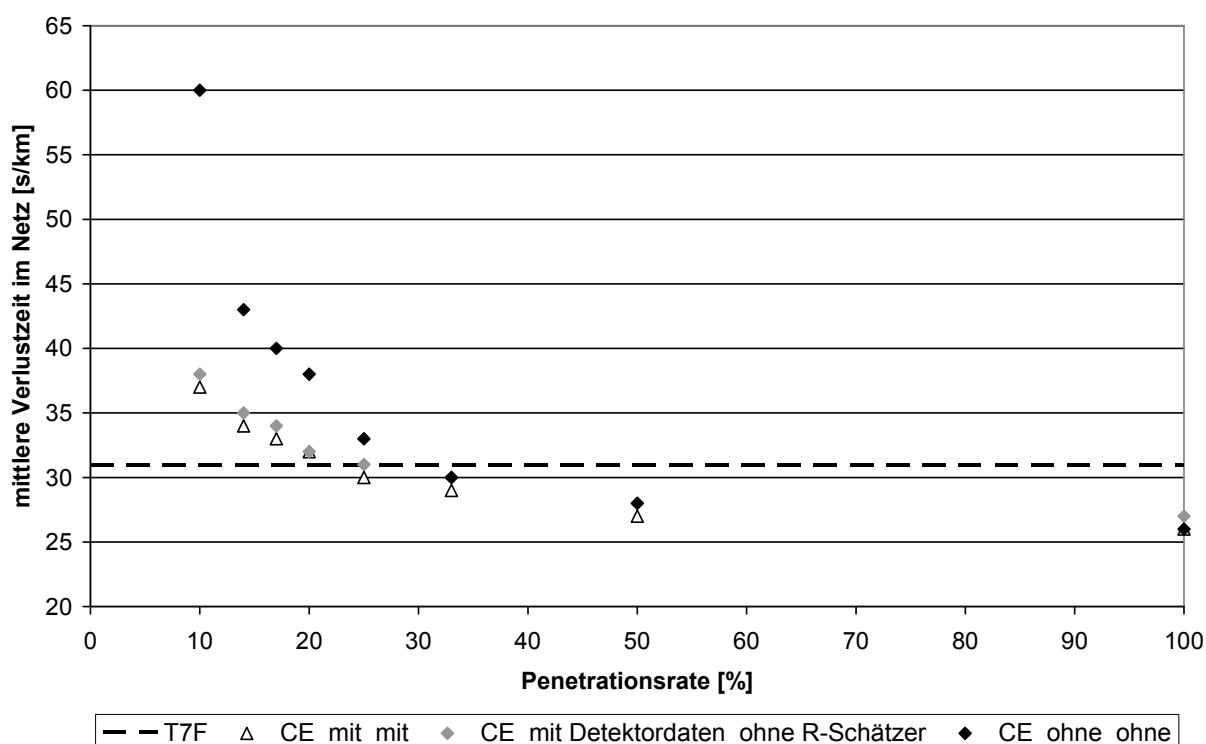
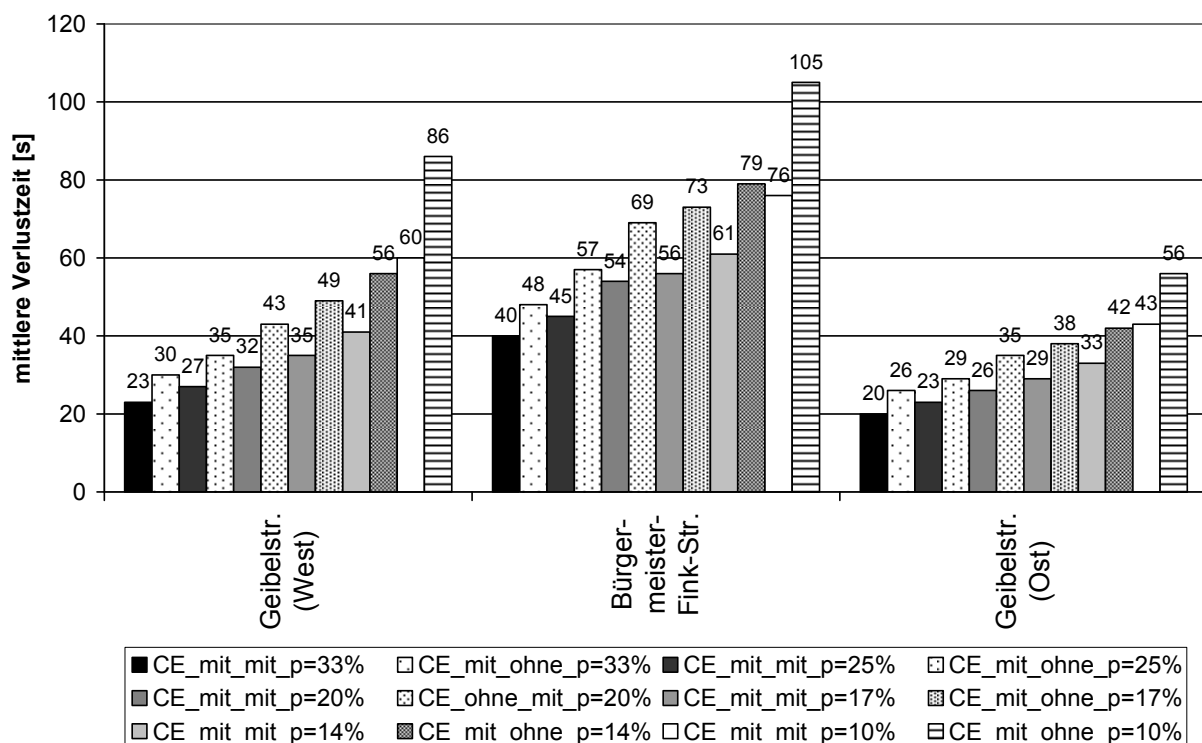


Abbildung 42: Zusammenhang zwischen der mittleren Verlustzeit [s/km] und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 1)

Den Nutzen der Methode zur Rückstauschätzung zeigt der Vergleich von *CE\_mit\_mit* und CE mit haltliniennahen Detektoren jedoch ohne Rückstauschätzung (*CE\_mit Detektordaten\_ohne R-schätzer*). Bereits ab Penetrationsraten  $p<100\%$  führt die Methode zur Rückstauschätzung zur Reduzierung der mittleren Verlustzeiten. Im Rahmen der netzweiten Betrachtung sind die Unterschiede in den Szenarios *CE\_mit\_mit* und *CE\_mit Detektordaten\_ohne R-schätzer* allerdings marginal, da hier der Verkehrsablauf in den Zufahrten mit hoher Verkehrsnachfrage für das arithmetische Mittel der betrachteten verkehrlichen Kenngrößen maßgebend ist. Für die Darstellung des Nutzens der Methode zur Rückstauschätzung wird daher der Ver-

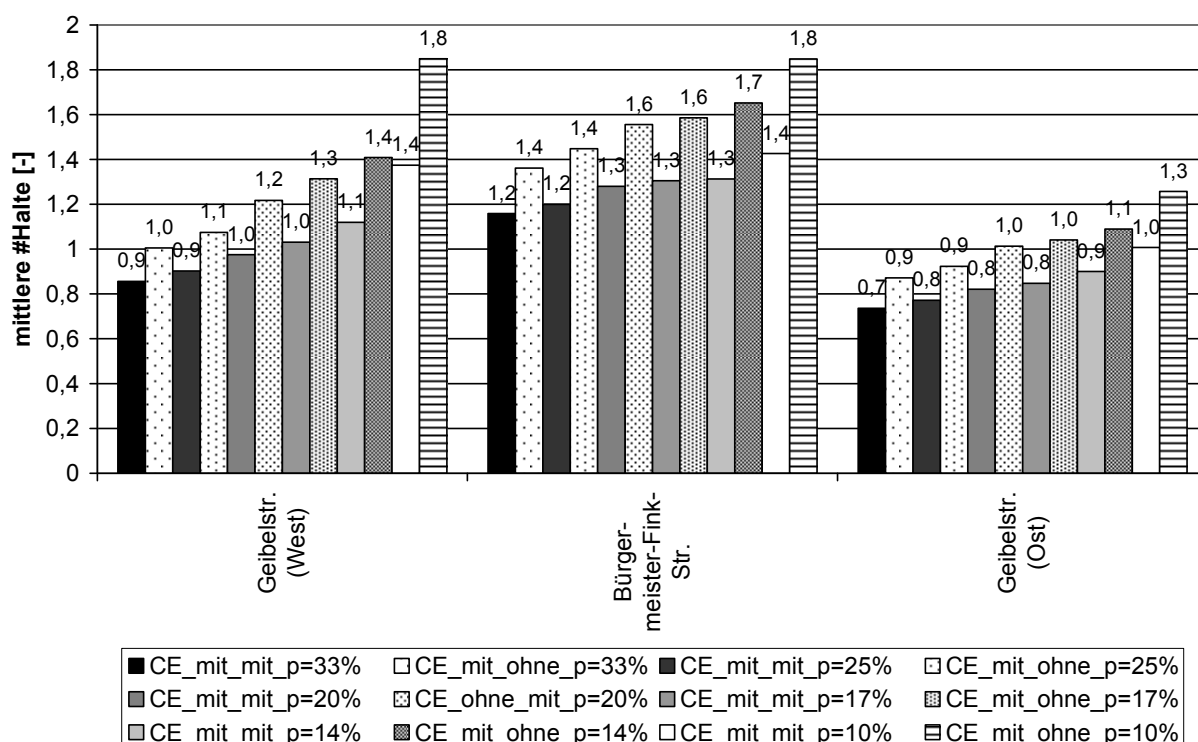
kehrsablauf in ausgewählten Zufahrten im Folgenden betrachtet. Insbesondere in Nebenströmen können die Verlustzeiten und die Anzahl an Haltvorgängen durch die verbesserte Verkehrslageschätzung deutlich reduziert werden.

In der westlichen Zufahrt am KP Hildesheimer Straße/Geibelstraße (vgl. Abbildung 37, KP 422) beträgt die Reduzierung der mittleren Verlustzeit bereits für  $p=33\%$  ca. 20% (vgl. Abbildung 43). Erwartungsgemäß steigt der positive Nutzen der verwendeten Methode mit sinkenden Ausstattungsraten. Bei geringen Ausstattungsraten von 10% werden Reduzierungen in der mittleren Verlustzeit von bis zu 30% beobachtet. Auf Basis der verbesserten Verkehrslageschätzung können insbesondere die Freigabezeiten für Nebenströme genauer bemessen werden. In der Folge reduziert sich auch die Anzahl der Halte bereits bei mittleren Penetrationsraten von 33% um ca. 15% (vgl. Abbildung 37, KP 421, Bürgermeister-Fink-Straße (westliche Zufahrt)). Die maximale Reduzierung beträgt für  $p=10\%$  ca. 20% (vgl. Abbildung 44). Die Analyse des Verkehrsablaufs in den übrigen Zufahrten im Netz folgt in Abschnitt 7.2.2.



**Abbildung 43: Darstellung des Nutzens der Methode zur Rückstauschätzung für Nebenströme anhand des Vergleichs der mittleren Verlustzeit je Kilometer in den Szenarios CE\_mit\_mit und CE\_mit Detektordaten\_ohne\_R-schätzer für  $p \leq 33\%$**





**Abbildung 44: Darstellung des Nutzens der Methode zur Rückstauschätzung für Nebenströme anhand des Vergleichs der mittleren #Halte je Kilometer in den Szenarios CE\_mit\_mit und CE\_mit Detektordaten\_ohne\_R-schätzer für  $p \leq 33\%$**

Die Betrachtung der Kenngrößen mittlere Anzahl an Halten und mittlere Haltezeit je Kilometer im Netz zeigt die verkehrliche Wirkung der beiden unterschiedlichen Konzepte von T7F und CE zur Optimierung des innerstädtischen Verkehrsablaufs (vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46). Während T7F anstrebt, Fahrzeuge zunächst in Pulks zu bündeln, um diese auf Basis optimierter Versatzzeiten haltfrei durch das Netz zu lenken, reagiert CE unmittelbar auf die augenblickliche Verkehrsnachfrage in den Zufahrten ohne aktive Bündelung von Fahrzeugen zu Pulks. Die hohe Dynamik und Flexibilität des entwickelten azyklischen Verfahrens CE bedingt eine Zunahme der Anzahl an Phasenübergängen und somit eine Zunahme der Dauern von Alles-Rot-Zeiten gegenüber T7F. Häufige Phasenübergänge in Verbindung mit zu gering dimensionierten Freigabezeitdauern können in der Folge zu einer unerwünschten Zunahme der Halte- und Anfahrvorgängen führen. Innerhalb von CE wird die Anzahl an Halten wesentlich von der Strategie der Warteschlangenleerung beeinflusst. Die in Abschnitt 5.5.3.1 beschriebene und in CE verwendete Methode zur bedarfsgerechten Bemessung von Freigabezeiten ist hier ein elementarer Baustein, der dazu führt, dass das Konzept von CE nicht per se zu einer Erhöhung der Halte führt. So beträgt die Anzahl an Halten sowohl im Referenzszenario als in allen Szenarios mit CE für  $p=100\%$  ca. 1,03 je Kilometer (vgl. Abbildung 45). Für  $p < 100\%$  ist lediglich eine leicht erhöhte Anzahl an Halten in allen CE Szenarios infolge der verminderten Qualität des Verkehrslagebilds gegenüber T7F zu beobachten. Erneut spiegelt sich der Nutzen der Methode zur Rückstauschätzung und der Verwendung haltliniennaher Detektoren in der reduzierten Anzahl an Halten bei mittleren und geringen Ausstattungsraten ( $p \leq 33\%$ ) wider.

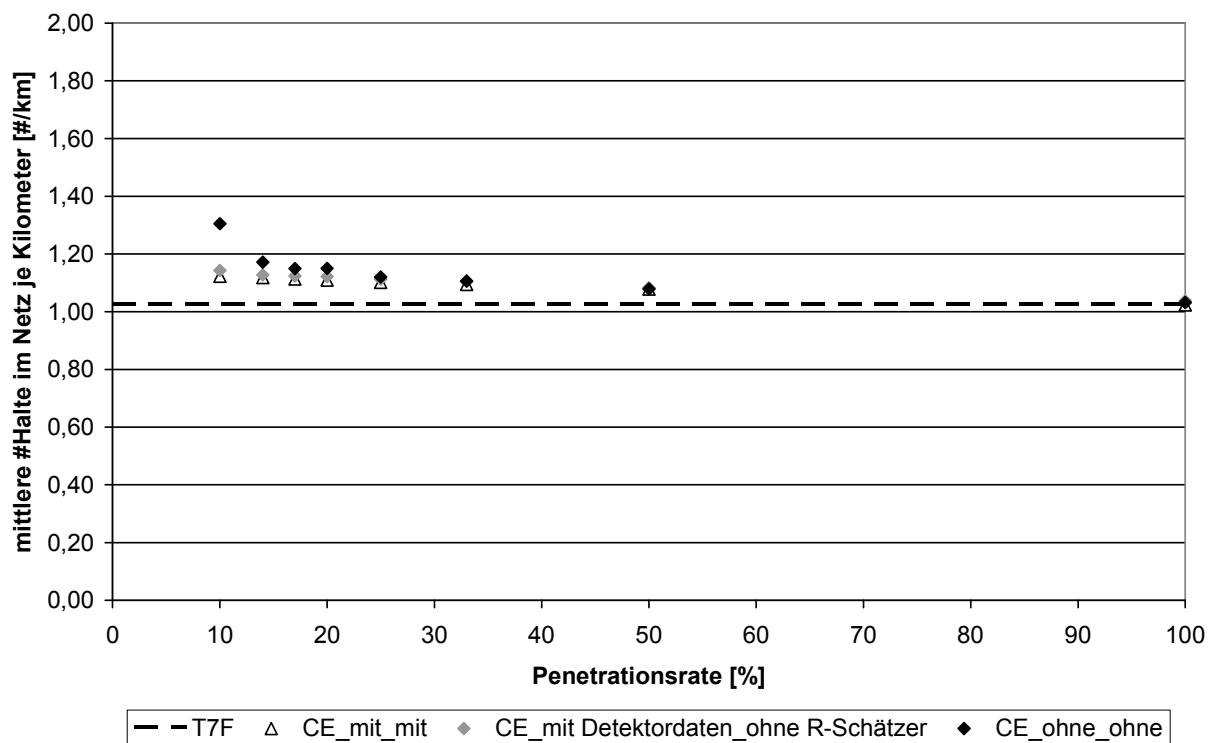


Abbildung 45: Zusammenhang zwischen der mittleren Anzahl an Halten je Kilometer und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 1)

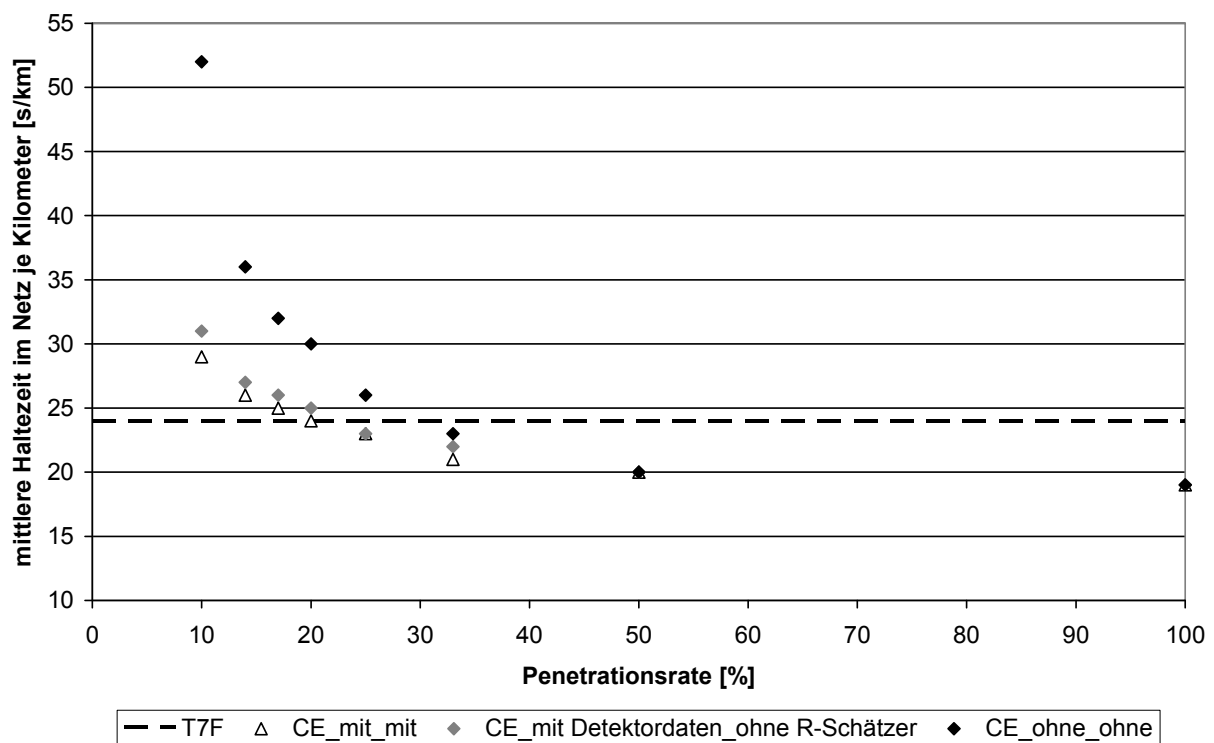


Abbildung 46: Zusammenhang zwischen der mittleren Haltezeit je Kilometer und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 1)

Während die mittlere Anzahl an Halten mit *CE\_mit\_mit* nahezu dem Niveau von T7F entspricht, konnte die mittlere Haltezeit je Kilometer mit *CE\_mit\_mit* deutlich um mehr als 20% ( $p=100\%$ ) bzw. um ca. 10% ( $p=33\%$ ) reduziert werden (vgl. Abbildung 46). Demnach kann CE, trotz einer konstanten und bekannten Verkehrsnachfrage für T7F, die Freigabezeitdauern effizienter den einzelnen Phasen durch die sinnvolle Verwendung von V2I-Kommunikationsdaten zuteilen. Erneut zeigt sich die Abhängigkeit der Güte von CE von dem Ausstattungsgrad an kommunikationsfähigen Fahrzeugen. Die mittlere Haltezeit steigt mit abnehmender Penetrationsrate deutlich an.

Die Betrachtung der Kenngröße Gesamtreisezeit im Netz zeigt am deutlichsten, dass CE selbst bei mittleren Penetrationsraten den Verkehrsablauf in städtischen Straßennetzen im Vergleich zu T7F deutlich verbessern kann (vgl. Abbildung 47). So reduziert sich die Gesamtreisezeit im Netz, trotz idealisierter Bedingungen für die Referenzsteuerung, im Szenario *CE\_mit\_mit* schon bei einer Penetrationsrate von 25% um durchschnittlich ca. 3h bzw. 1%. Im Idealfall einer Vollausstattung kann im Szenario *CE\_ohne\_ohne* die mittlere Aufenthaltsdauer jedes Fahrzeuges im Netz um ca. 10s reduziert werden. Dies entspricht einer Verminderung der Gesamtreisezeit um ca. 4% bzw. 14h Reisezeit im betrachteten Zeitraum (07:30-08:30 Uhr). Die bisherige Analyse der verkehrlichen Kenngrößen: mittlere Verlustzeit, mittlere Anzahl an Halten und mittlere Haltzeit im Netz hat gezeigt, dass bei einer Vollausstattung von  $p=100\%$  die Methode zur Verkehrslageschätzung und Daten haltliniennaher Detektoren keinen zusätzlichen Nutzen für das entwickelte Steuerungsverfahren beinhalten und damit bei einer Vollausstattung entbehrlich sind. Die verkehrlichen Kenngrößen sind in allen CE Szenarios nahezu identisch. Die Betrachtung der Gesamtreisezeit im Netz bestätigt dies. Die Reduzierung der netzweiten Reisezeiten mit *CE\_ohne\_ohne* im Vergleich zu den weiteren CE Szenarios sind marginal.

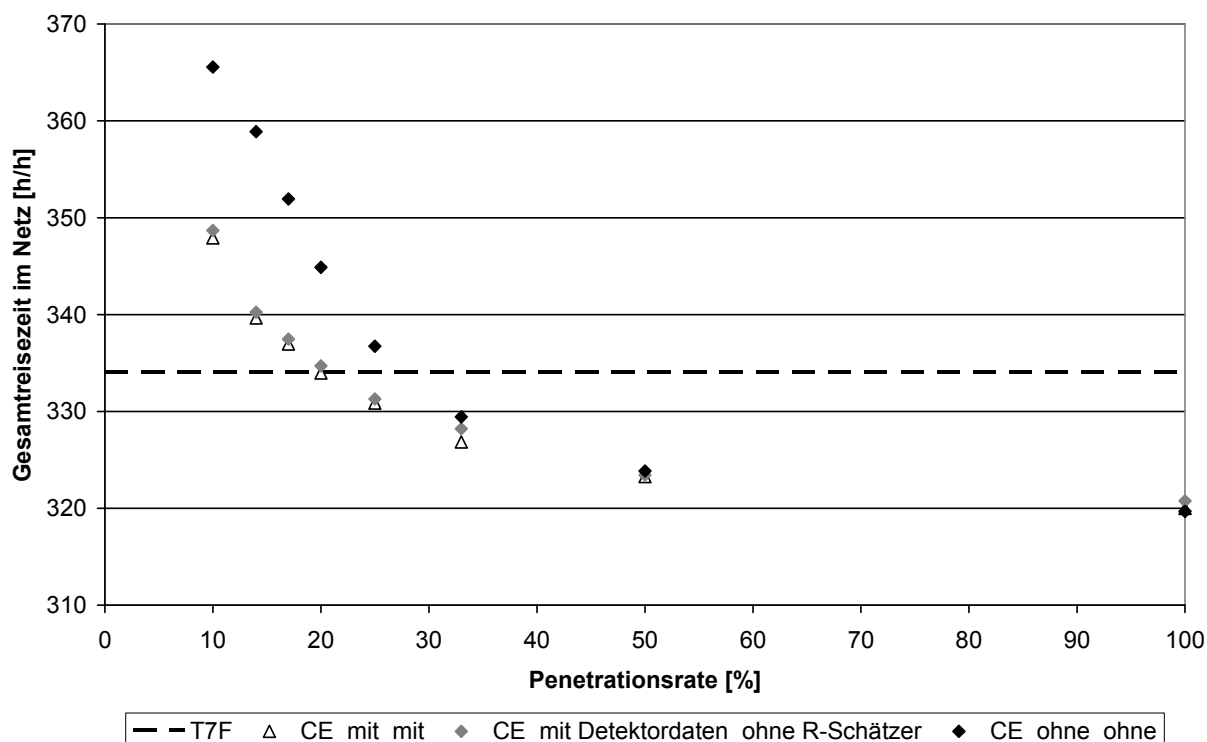


Abbildung 47: Gesamtreisezeit im Netz (Nachfrageszenario 1)

### 7.2.2 Kantenfeine Betrachtung

Die bisherigen Ergebnisse der netzweiten Betrachtung haben gezeigt, dass die Berücksichtigung Daten haltliniennaher Detektoren und die Methode zur Rückstauschätzung innerhalb von CE für Penetrationsraten von weniger als 100% erwartungsgemäß den höchsten Nutzen aufweisen. Im Idealfall einer Vollausrüstung ( $p=100\%$ ) kann hingegen auf zusätzliche Methoden und Datenquellen verzichtet werden, da alle Fahrzeuge mit V2I-Kommunikation frühzeitig und kontinuierlich erfasst werden können. Abbildung 48 zeigt daher die resultierenden mittleren Verlustzeiten [s/km] aller Zufahrten für die Referenzsteuerung T7F, *CE\_mit\_mit* ( $25\% \leq p < 100\%$ ) und *CE\_ohne\_ohne* ( $p=100\%$ ) in Form eines Säulendiagramms. Die im Weiteren genannten Identifikationsnummern (IDs) für die betrachteten Zufahrten werden in Anhang A 1 den Netzkanten zugeordnet.

Sowohl in den dargestellten CE-Szenarios als auch im Referenzszenario betragen die mittleren Verlustzeiten in nahezu allen Zufahrten weniger als 35s. Dies entspricht einer Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (QSV) gemäß dem HBS (FGSV, 2005) von A<sup>8</sup> ( $\leq 20s$ ) bzw. B<sup>9</sup> ( $\leq 35s$ ). Die Qualität des Verkehrsablaufs ist damit bereits im Referenzszenario als gut bis sehr gut zu bewerten und das Optimierungspotential entsprechend begrenzt. Auffällig sind die erhöhten mittleren Verlustzeiten  $>35s$  im Referenzszenario T7F in vier Zufahrten, die einer QSV C<sup>10</sup> ( $\leq 50s$ ) entsprechen. Die höchsten mittleren Verlustzeiten treten in den Zufahrten 1627021647 (KP 423 Hildesheimer Straße/Altenbekener Damm, östliche Zufahrt) und 1627021497 (KP 421 Hildesheimer Straße/ Bürgermeister-Fink-Straße, westliche Zufahrt) mit 46s/km bzw. 44s/km auf. Im Folgenden werden die genannten Zufahrten mit QSV C näher betrachtet.

Der KP 423 Hildesheimer Straße/ Altenbekener Damm ist der zentrale Knotenpunkt im betrachteten Testnetz Hannover-Südstadt. Hier kreuzen sich die zwei zu koordinierende Haupttrouten Hildesheimer Straße und Altenbekener Damm (vgl. Abschnitt 6.2.1). Der betrachtete Knotenpunkt wird, aufgrund der geringen räumlichen Distanz, zusammen mit KP 412 als ein kombinierter Knotenpunkt mit drei Phasen lichtsignaltechnisch in CE geregelt (vgl. Anhang A 7). Innerhalb von T7F erfolgt die Koordinierung der KP 412 und 423 mit Hilfe optimierter Versatzzeiten. Während für die Linksabbiegerströme von der Hildesheimer Straße eine eigene Phase (Phase 3) planerisch konzipiert wurde, werden die entsprechenden Fahrbeziehungen auf dem Altenbekener Damm zusammen mit den Geradeausströmen als bedingt verträglich in Phase 2 bedient<sup>11</sup>.

<sup>8</sup> QSV A: Die Mehrzahl der Verkehrsteilnehmer kann ungehindert den Knotenpunkt passieren. Die Wartezeiten sind sehr kurz.

<sup>9</sup> QSV B: Alle während der Sperrzeit ankommende Verkehrsteilnehmer können in der nachfolgenden Freigabezeit weiterfahren. Die Wartezeiten sind kurz.

<sup>10</sup> QSV C: Nahezu alle während der Sperrzeit ankommende Verkehrsteilnehmer können in der nachfolgenden Freigabezeit weiterfahren. Die Wartezeiten sind spürbar. Beim Kraftfahrzeugverkehr tritt im Mittel nur geringer Stau am Ende der Freigabezeit auf.

<sup>11</sup> Innerhalb von T7F erfolgt keine Optimierung der Phaseneinteilungen. Es wurden daher für alle signalisierten Knotenpunkte des Testnetzes Hannover-Südstadt die Phaseneinteilungen gemäß der Planungsunterlagen der Landeshauptstadt Hannover (Festzeitprogramme für die morgendliche Spitzenverkehrszeit) übernommen.

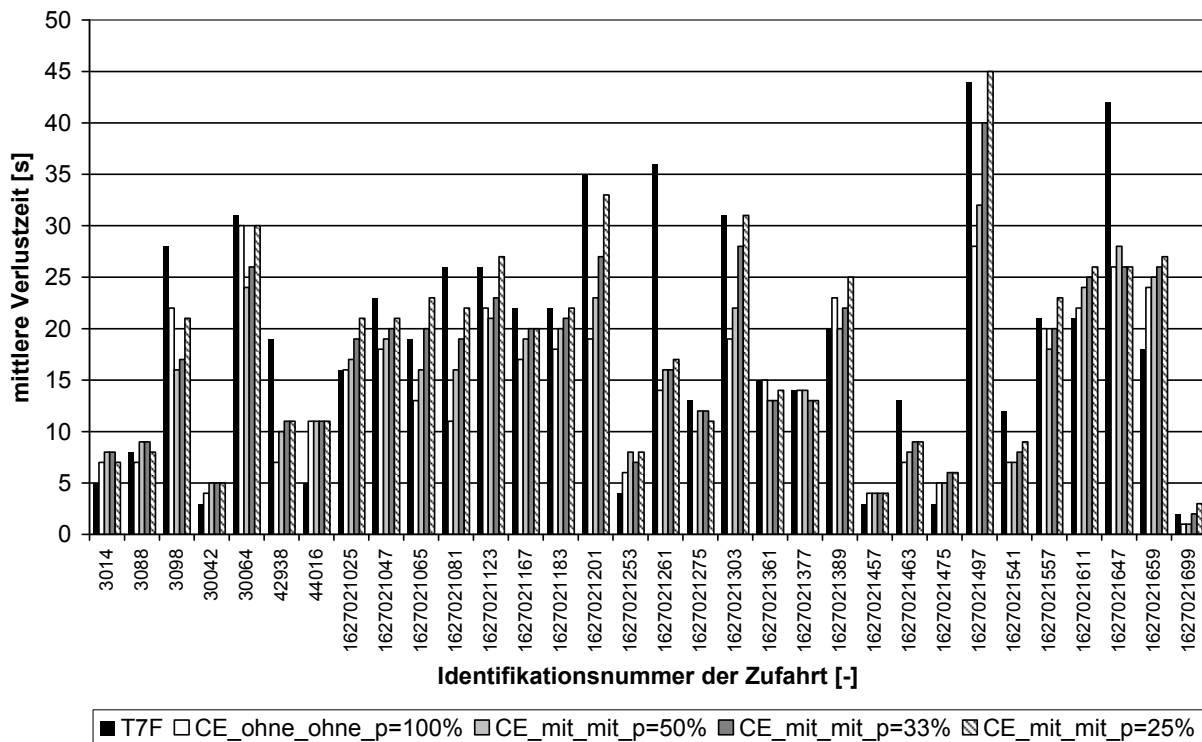
Die Analyse des Verkehrsablaufs im Referenzszenario zeigte, dass in Folge zu gering bemessener Freigabezeiten für den (bedingt verträglichen) linksabbiegenden Fahrzeugstrom in der westlichen Zufahrt (ID: 1627021647), Rückstaus nicht vollständig abgebaut wurden. In der Folge entstanden sukzessiv anwachsende Warteschlange, die teilweise den Geradeausstrom auf dem Altenbekener Damm blockierten und schließlich zu sehr hohen mittleren Verlustzeiten von deutlich mehr als 100s (QSV F)<sup>12</sup> in der östlichen Zufahrt (ID: 1627021647) geführt haben. Vor diesem Hintergrund wurde die Freigabezeit für die bedingt verträglichen Linksabbiegerströme auf dem Altenbekener Damm in Phase 3 (IDs: 44016, 1627021647) um 5s verlängert und die Freigabezeitdauer für die Hauptströme auf der Hildesheimer Straße in Phase 1 (IDs: 1627021659, 1627021611) um 5s verkürzt (vgl. Anhang A 4). In der Folge konnten die mittleren Verlustzeiten in der östlichen Zufahrt des Altenbekener Damms um ein Vielfaches auf 46s/km reduziert werden, während sich die mittleren Verlustzeiten in der Hauptrichtung nur geringfügig erhöhten. Der zeitliche Beginn der Phasen 1 und 2 und damit die verkehrliche Wirkung der optimierten Versatzzeiten blieben unverändert.

Die erhöhten mittleren Verlustzeiten in den Zufahrten mit den IDs 1627021201 und 1627021497 von bis zu 44s sind hingegen in der geringen Verkehrsnachfrage begründet. Bei diesen Zufahrten handelt es sich um zwei Nebenströme mit geringer Verkehrsnachfrage am 2-phasig gesteuerten KP 421 Hildesheimer Straße/ Krausenstraße (vgl. Abbildung 37). Die Hauptrichtung des KP 421 wird im Zuge der Hauptroute Hildesheimer Straße zusammen mit den KP 422 und 423 koordiniert. Entsprechend der deutlich höheren Verkehrsnachfrage in Koordinierungsrichtung werden innerhalb T7F die Freigabezeitanteile für die Hauptrichtung mit 66s deutlich höher bemessen als für die Nebenrichtung mit 13s (vgl. Anhang A 4). Die entstehenden mittleren Verlustzeiten für die Hauptrichtung sind demzufolge mit nur ca. 3s sehr gering (IDs: 1627021475, 1627021457). Für die erhöhten mittleren Verlustzeiten in der Zufahrt 1627021261 (KP 452 Altenbekener Damm/ Jordanstraße, westliche Zufahrt) von 36s/km sind hingegen keine Gründe offensichtlich.

Erwartungsgemäß erhöhen sich die mittleren Verlustzeiten mit abnehmender Penetrationsrate. An einzelnen Zufahrten treten allerdings bei einer idealen Ausstattungsrate von  $p=100\%$  höhere mittlere Verlustzeiten auf als bei  $p=50\%$ . So zum Beispiel an den Zufahrten mit den IDs 1627021123 und 1627021557, welche die Nebenrichtungen am KP 422 Hildesheimer Straße/ Geibelstraße bilden. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Nebenrichtungen 30064 bzw. 3098 an den KP 402 und 403. Ein möglicher Grund hierfür könnte in der Überschätzung von Rückstaulängen in Folge nicht vollständig abgebauter Warteschlangen und schnell vorrückenden Fahrzeugen liegen (vgl. Abschnitt 5.5.1.3). Da sich dieses Phänomen jedoch auf vereinzelte Zufahrten beschränkt, wird nicht von einem systematischen Schätzfehler der Rückstaulängen ausgegangen.

---

<sup>12</sup> QSV F: Die Nachfrage ist größer als die Kapazität. Die Fahrzeuge müssen bis zu ihrer Abfertigung mehrfach vorrücken. Der Rückstau wächst stetig. Die Wartezeit ist extrem lang. Die Anlage ist überlastet.



**Abbildung 48: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten für  $p \geq 25\%$  (Nachfrageszenario 1)**

Im Fokus der kantenfeinen Betrachtung steht zudem die Qualität des Verkehrsablaufs im Verlauf der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (vgl. Abschnitt 6.2.1). Tabelle 5 zeigt, dass CE in nahezu allen Zufahrten in Koordinierungsrichtung die mittleren Verlustzeiten reduziert, obwohl bereits im Referenzszenario der Verkehrsablauf überwiegend als „sehr gut“ bewertet wird und nur geringe Verlustzeiten auftreten (vgl. Abbildung 48). Die maximale Minderung der Verlustzeit beträgt 16s/km an der Zufahrt 1627021647. Einzig im Verlauf der Hauptroute Hildesheimer Straße erhöhen sich die mittleren Verlustzeiten von CE im Vergleich zu T7F um bis zu 5s ( $p=25\%$ ).

Die Tabelle zeigt zudem, dass der Qualitätsverlust von *CE\_mit\_mit* im Zuge abnehmender Penetrationsraten für  $25\% \leq p \leq 100\%$  auf den Hauptrouten gering ist. So beträgt die Zunahme der mittleren Verlustzeiten zwischen  $p=100\%$  und  $p=25\%$  maximal 4s. In den überwiegenden Fällen ist der Unterschied mit durchschnittlich 1s sogar marginal. Die Analyse zeigt, dass trotz des dezentralen Ansatzes Koordinierungsstrategien in CE sehr gut realisiert werden können und eine hohe Qualität des Verkehrsablaufs auch bei mittleren Penetrationsraten auf den Hauptrouten erreicht wird.

**Tabelle 5: Verlustzeitdifferenzen von *CE\_ohne\_ohne* ( $p=100\%$ ) bzw. *CE\_mit\_mit* (50%, 33%, 25%) im Vergleich zu T7F in den Hauptrichtungen der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (Nachfrageszenario 1)**

Haupttrouten	Zufahrt-ID <sup>13</sup>	$\Delta$ mittlere Verlustzeit CE – T7F [s/km]			
	[-]	p=100% (ohne_ohne)	p=50% (mit_mit)	p=33% (mit_mit)	p=25% (mit_mit)
Hildesheimer Straße in Richtung Norden	1627021611	+ 1	+ 3	+ 4	+ 5
	1627021541	- 5	- 5	- 4	- 3
	1627021475	+ 2	+ 2	+ 3	+ 3
Rudolf-von-Bennigsen-Ufer in Richtung Norden	42938	- 12	- 9	- 8	- 8
	3088	- 1	+ 1	+ 1	0
Altenbekener Damm in Richtung Westen	1627021377	0	0	- 1	- 1
	1627021275	- 3	- 1	- 1	- 2
	1627021647	- 16	- 14	- 16	- 16

Die mittleren Verlustzeiten in den Nebenrichtungen der koordinierten Knotenpunkte sind in Tabelle 6 dargestellt. Die dargestellten Verbesserungen des Verkehrsablaufs in den Koordinierungsrichtungen in Form verminderter Verlustzeiten haben nur im geringen Umfang erhöhte mittlere Verlustzeiten in den Nebenrichtungen zur Folge. So können im Zuge der Koordinierung des Streckenzuges Rudolf-von-Bennigsen-Ufers (KP 402, 403 in Abbildung 37) die mittleren Verlustzeiten auch in den Nebenrichtungen durch CE um bis 12s (ID: 30064) verringert werden. Die vermuteten Hintergründe für die Reduzierung der mittleren Verlustzeiten für  $p=50\%$  gegenüber  $p=100\%$  wurden bereits genannt. Ebenso reduzieren sich die mittleren Verlustzeiten in der Nebenrichtung der Hauptroute Hildesheimer Straße an den KP Hildesheimer Straße/ Altenbekener Damm (KP 423, ID: 1627021647), Hildesheimer Straße/ Geibelstraße (KP 422, IDs: 1627021557, 1627021123) und Hildesheimer Straße/ Krausenstraße (KP 421, IDs: 1627021497, 1627021201) deutlich um bis zu 16s. Erst ab einer Penetrationsrate von 25% erhöht sich die mittlere Verlustzeit in den Zufahrten 1627021123, 1627021497 sowie 1627021557 und ist um bis zu 2s höher als im Referenzszenario.

Im Zuge der Koordinierung des Altenbekener Damms entstehen mit CE bereits vereinzelt bei hohen Penetrationsraten höhere mittlere Verlustzeiten als im Referenzszenario. Der deutlichste Unterschied ist am KP 423 Hildesheimer Straße/Altenbekener Damm mit bis zu 9s ( $p=25\%$ ) in der nördlichen Zufahrt 1627021659 zu beobachten. Im Zuge der Analyse der Verkehrsqualität in den Hauptrichtungen wurde bereits auf die diffizile Bemessung der bedingt verträglichen Linksabbiegerströme an diesem Knotenpunkt hingewiesen. Insgesamt konnte die Qualität des Verkehrsablaufs am KP 423 von QSV C auf QSV B mit CE im Vergleich zu T7F, aufgrund der deutlichen Reduzierung der mittleren Verlustzeiten in der westlichen Zufahrt (ID: 1627021647), verbessert werden.

<sup>13</sup> Eine Übersicht der verwendeten Identifikationsnummern für Zufahrten enthält Anhang (A 1).

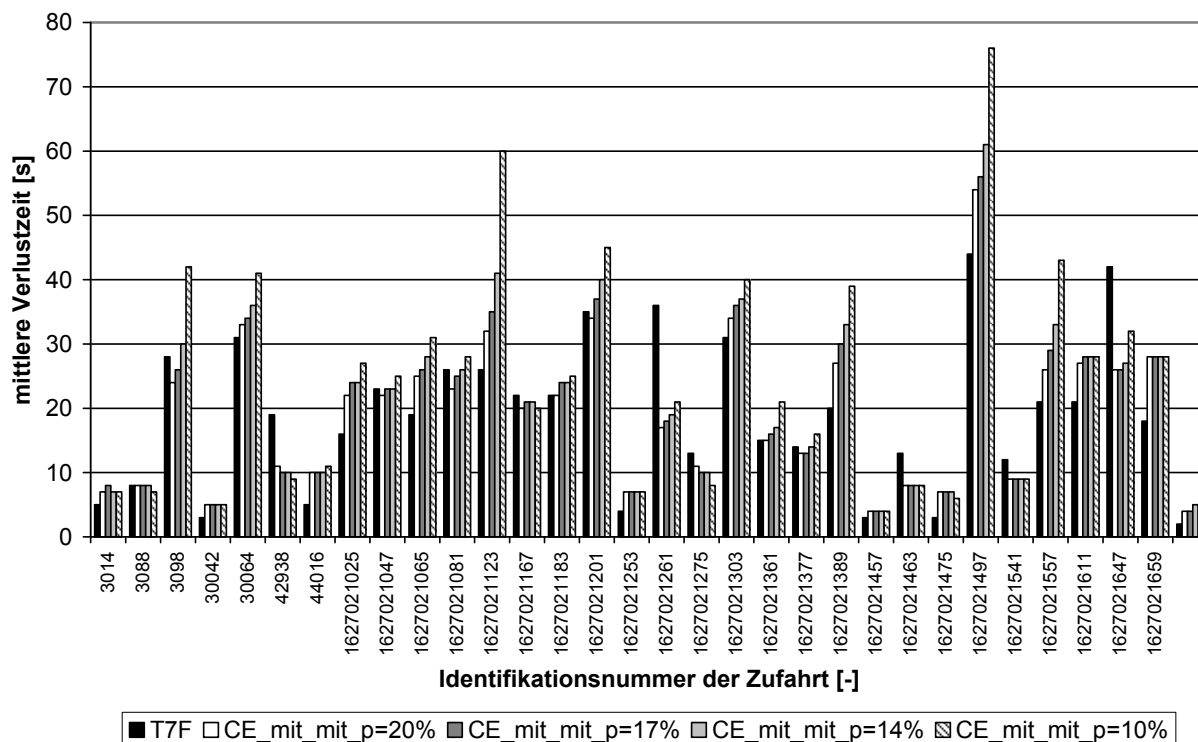
**Tabelle 6: Verlustzeitdifferenzen von *CE\_ohne\_ohne* ( $p=100\%$ ) bzw. *CE\_mit\_mit* (50%, 33%, 25%) im Vergleich zu T7F in den Nebenrichtungen der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (Nachfrageszenario 1)**

Haupttrouten	Zufahrt-ID	$\Delta$ mittlere Verlustzeit CE – T7F [s/km]			
	[–]	p=100% (ohne_ohne)	p=50% (mit_mit)	p=33% (mit_mit)	p=25% (mit_mit)
Hildesheimer Straße in Richtung Norden	1627021647	- 16	- 14	- 16	- 16
	1627021557	- 1	- 3	- 1	+ 2
	1627021123	- 4	- 5	- 3	+ 1
	1627021201	- 16	- 12	- 8	- 2
	1627021497	- 16	- 12	- 4	+ 1
Rudolf-von-Bennigsen-Ufer in Richtung Norden	3098	- 6	- 12	- 11	- 7
	30064	- 1	- 6	- 4	- 1
Altenbekener Damm in Richtung Westen	1627021361	0	- 2	- 2	- 1
	1627021389	+ 3	0	+ 2	+ 5
	1627021303	- 12	- 9	- 3	0
	1627021699	- 1	- 1	0	+ 1
	1627021611	+ 1	+ 3	+ 4	+ 5
	1627021659	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9
	1627021183	- 4	- 2	- 1	0
	1627021167	- 5	- 3	- 2	- 2

Tabelle 6 zeigt zudem, dass mit sinkender Penetrationsrate die mittleren Verlustzeiten in den Nebenrichtungen stärker ansteigen als in der Hauptrichtung. Insbesondere die Qualität des Verkehrsablaufs in Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage verringert sich deutlich. Wie bereits in Abschnitt 7.2.1 skizziert, sinkt mit abnehmender Penetrationsrate die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrzeuge mit OBUs die Kommunikationsreichweite erreichen und damit vom Algorithmus detektiert werden ehe diese mit nicht ausgestatteten Fahrzeugen gefüllt ist. Eine ausreichende Abschätzung der Verkehrslage ist damit nicht mehr möglich. Innerhalb von *CE\_mit\_mit* wird zwar auf Basis der Daten haltliniennaher Detektoren registriert, dass sich mindestens ein Fahrzeug in der Zufahrt befindet, eine Schätzung der Rückstaulänge und eine damit verbundene Bemessung der Freigabezeit (vgl. Kapitel 5.5.3.1) ist allerdings nicht möglich. In der Folge wird daher lediglich die Mindestfreigabezeit von 5s für die Nebenrichtung geschaltet, die nicht ausreicht, um die tatsächlich vorhandenen Warteschlangen abzubauen. Die Folge sind sukzessiv anwachsende Rückstaus, die sich in benachbarte Knotenpunkte fortpflanzen und zu einem netzweiten Verkehrszusammenbruch führen können. Verdeutlicht wird dieser Prozess durch den Vergleich der mittleren Verlustzeiten von Nebenströmen in den Szenarien *CE\_mit\_mit* für  $p=14\%$  und  $p=10\%$  (Abbildung 49). Insbesondere in den Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage an den Knotenpunkten Hildesheimer Straße/ Krausenstraße (vgl. Knotenpunkt 421 in Abbildung 37, westliche Zufahrt) und Hildesheimer Straße/ Geibelstraße (vgl. Knotenpunkt 422 in Abbildung 37, westliche Zufahrt) spiegelt die deutliche Zunahme der



mittleren Verlustzeiten um 19s (ID: 1627021123) bzw. 15s (ID: 1627021497) die beschriebenen Prozesse wider.



**Abbildung 49: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten für  $p \leq 20\%$  (Nachfrageszenario 1)**

Wie wichtig und notwendig die Einbeziehung Daten haltliniennaher Detektoren und die Methode zur Rückstauschätzung bei geringen und mittleren Ausstattungsrate ist, verdeutlicht der Vergleich der mittleren Verlustzeiten in den Szenarios *CE\_mit\_mit* ( $p=14\%$ ) und *CE\_ohne\_ohne* ( $p \leq 25\%$ ). Abbildung 50 zeigt, dass die mittleren Verlustzeiten in den Nebenrichtungen mit geringer Verkehrsnachfrage bei abnehmender Penetrationsrate überproportional ansteigen und deutlich höher sind als in *CE\_mit\_mit* für  $p=14\%$ . Bereits ab einer Penetrationsrate von 25% beträgt die mittlere Verlustzeit in der Zufahrt 1627021497 im Szenario *CE\_ohne\_ohne* mehr als 70s (QSV E<sup>14</sup>). Bei einer Ausstattungsrate von 20% wurden mittlere Verlustzeiten von bis zu 101s beobachtet. Die mittleren Verlustzeiten in den Zufahrten 30064 und 1627021201 entsprechen für  $p=20\%$  einer QSV E. Eine erhöhte Gefahr von Netzzusammenbrüchen in Folge von Rückstau in benachbarte Knotenpunkte ist somit gegeben.

<sup>14</sup> QSV E: Die Verkehrsteilnehmer stehen in erheblicher Konkurrenz zueinander. Im Kraftfahrzeugverkehr stellt sich ein allmählich wachsender Rückstau ein. Die Wartezeiten sind sehr lang. Die Kapazität der Anlage wird erreicht.

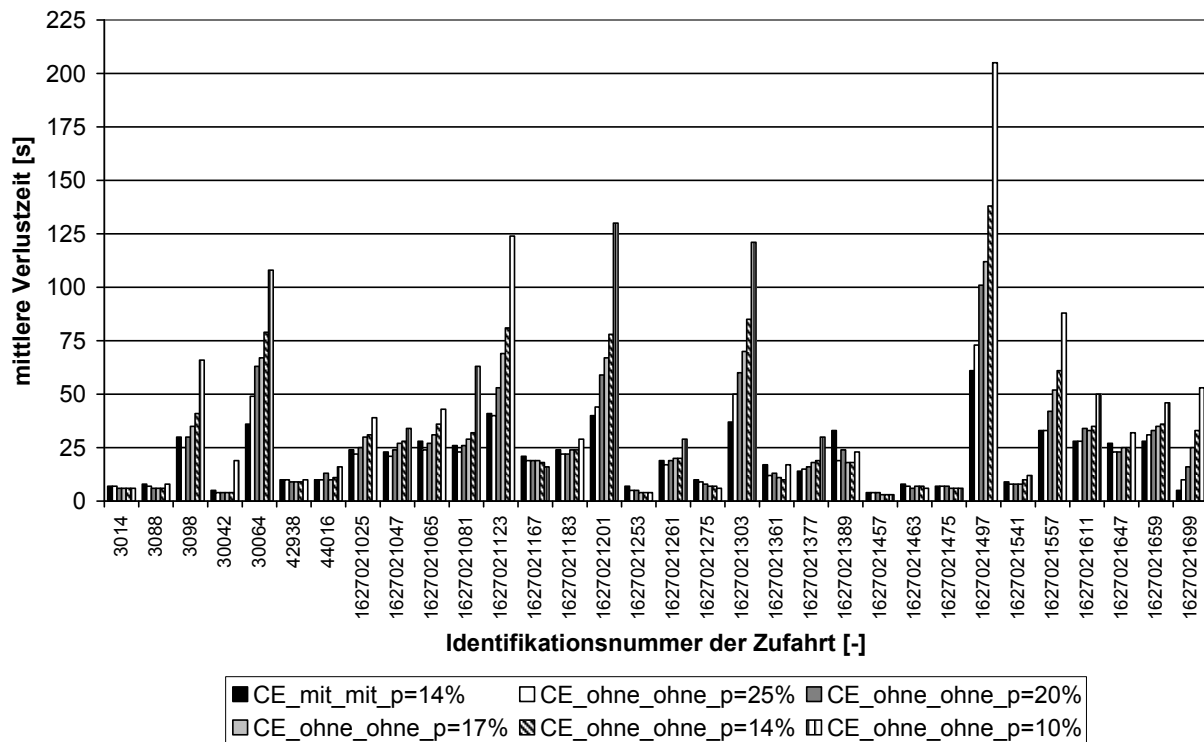
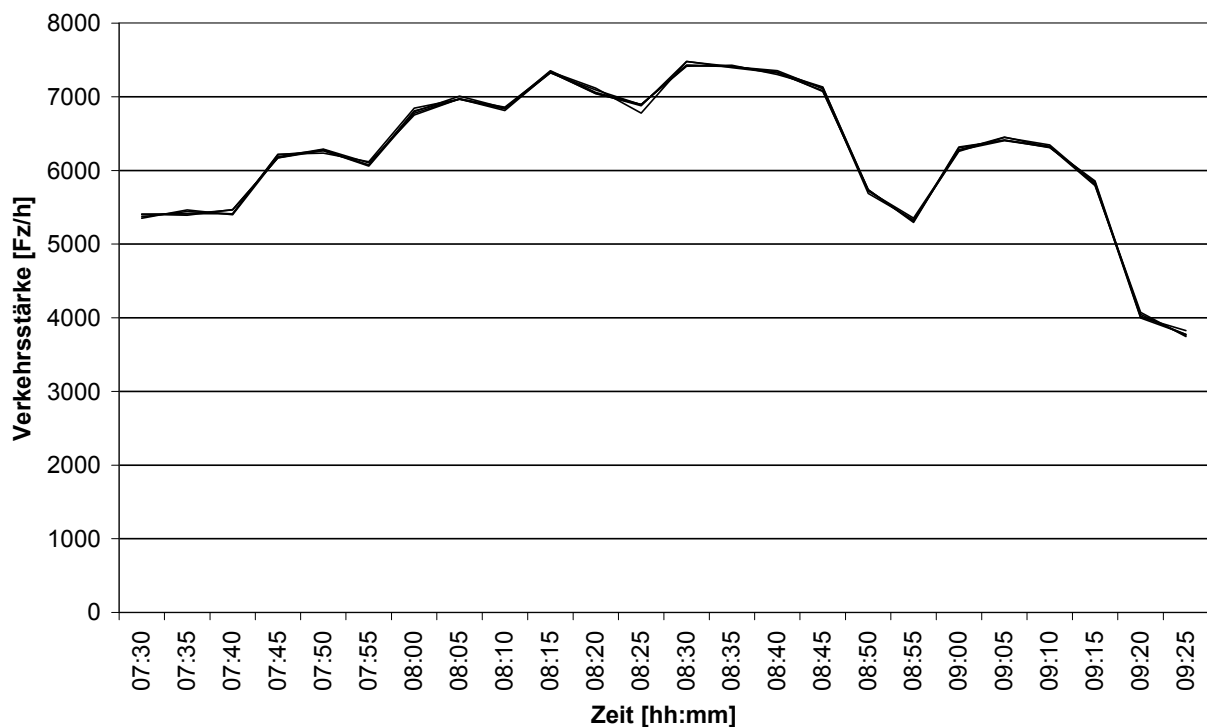


Abbildung 50: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten im Nachfrageszenario 1 für CE  $p=14\%$  und CE\_ohne\_ohne ( $p \leq 25\%$ )

### 7.3 Nachfrageszenario 2: Dynamische Schwankungen in der Verkehrsnachfrage

Für das Nachfrageszenario 2 werden dynamische Schwankungen in der Verkehrsnachfrage entsprechend einer typischen Ganglinie der morgendlichen Spitzenverkehrszeit in der Landeshauptstadt Hannover angenommen (vgl. Tabelle 4). Abbildung 51 zeigt den Verlauf der modellierten Verkehrsstärken in dem Testnetz Hannover-Südstadt. Das Maximum der Verkehrsstärke wird mit ca. 7500Fz/h zwischen 08:30-08:35Uhr erreicht, während die geringste mittlere Verkehrsstärke zwischen 09:25Uhr und 09:30Uhr mit ca. 3800Fz/h auftritt. Die in den folgenden Abbildungen gekennzeichneten Datenpunkte der Reihe CE entsprechen dem Szenario CE\_ohne\_ohne für  $p=100\%$  und CE\_mit\_mit für  $p<100\%$ .



**Abbildung 51: Mittlere Verkehrsstärke im Testnetz Hannover-Südstadt für den Zeitraum 07:30-09:30Uhr (Nachfrageszenario 2)**

### 7.3.1 Netzweite Betrachtung

Abbildung 52 zeigt die beobachteten mittleren Verlustzeiten im Referenzszenario T7F und CE für  $p \geq 25\%$  als Zeitreihe für den betrachteten Zeitraum von 07:30-09:30Uhr. Es wird deutlich, dass die in Abschnitt 5.1 als Ziel formulierte schnelle und dynamische Anpassung der Freigabezeiten an die augenblickliche Verkehrsnachfrage in den einzelnen Zufahrten erreicht wird. Beispielhaft wird das Zeitintervall 08:40-08:50Uhr betrachtet. In diesem Zeitraum sinkt die mittlere Verkehrsstärke im Netz von ca. 7300Fz/h auf ca. 5800Fz/h. CE kann unmittelbar auf die sinkende Verkehrsnachfrage in den Zufahrten reagieren und die Freigabezeiten entsprechend bemessen. In der Folge sinken die mittleren Verlustzeiten im Netz ab 08:45 Uhr in allen dargestellten CE-Szenarios deutlicher als im Referenzszenario. Insbesondere im Bereich der Verkehrsstärkemaxima (08:30-08:45Uhr) und -minima (09:20-09:30Uhr) können deutliche Reduzierungen der mittleren Verlustzeiten um bis zu 27% bzw. 10s/km erreicht werden ( $p \geq 50\%$ ). Aber auch bei mittleren Penetrationsraten von 25% bzw. 33% ist eine deutliche Verbesserung des Verkehrsablaufs im Bereich höherer Verkehrsstärken festzustellen. So reduziert sich die Verlustzeit im Zeitraum 08:35-08:45 Uhr um durchschnittlich 4s/km ( $p=25\%$ ) bzw. 6s/km ( $p=33\%$ ).

Die in Abbildung 53 dargestellten Zeitreihen für CE mit  $p \leq 20\%$  zeigen, dass auch bei geringen Penetrationsraten von nur 17% Reduzierungen der mittleren Verlustzeiten im Bereich höherer Verkehrsstärken erreicht werden können (08:20-08:45Uhr). Deutliche Verbesserungen im Verkehrsablauf werden im Zuge dynamischer Schwankungen in der mittleren Verkehrsstärke beobachtet. So reduziert sich die mittlere Verlustzeit im Zeitintervall 08:45-09:00Uhr um bis zu 4s/km ( $p=20\%$ ).

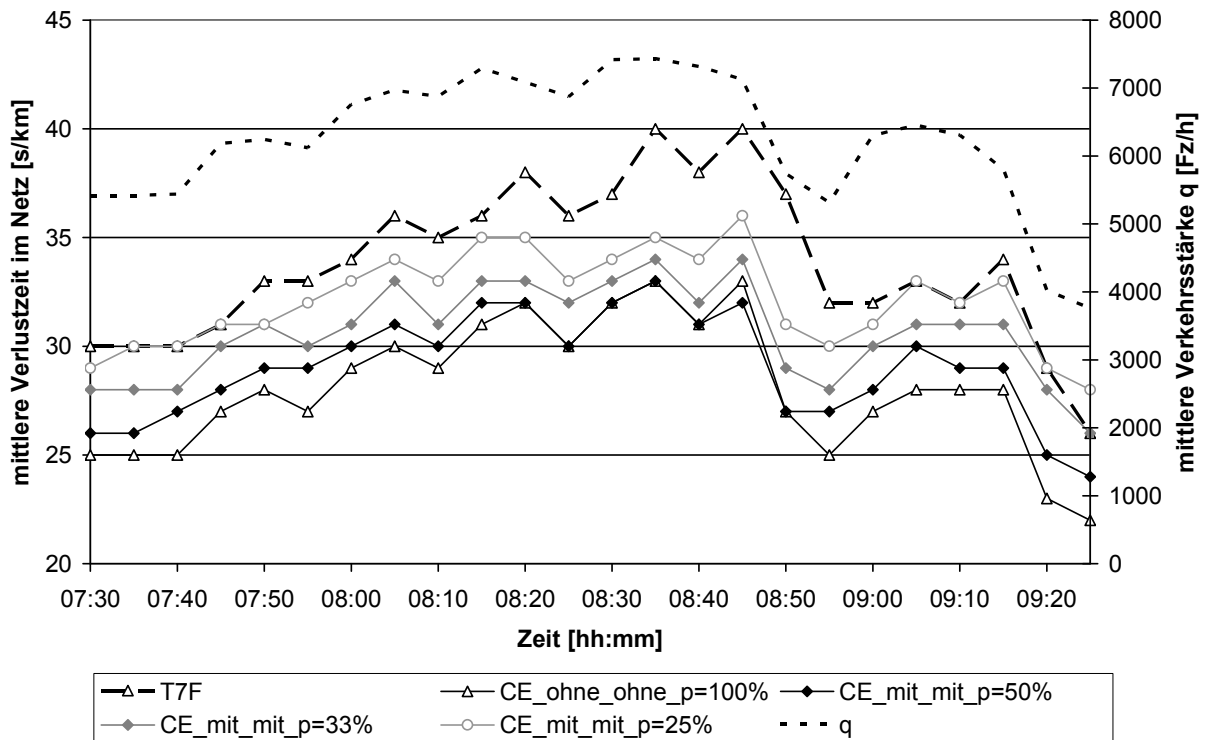


Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der mittleren Verlustzeit für  $p \geq 25\%$  (Nachfrageszenario 2)

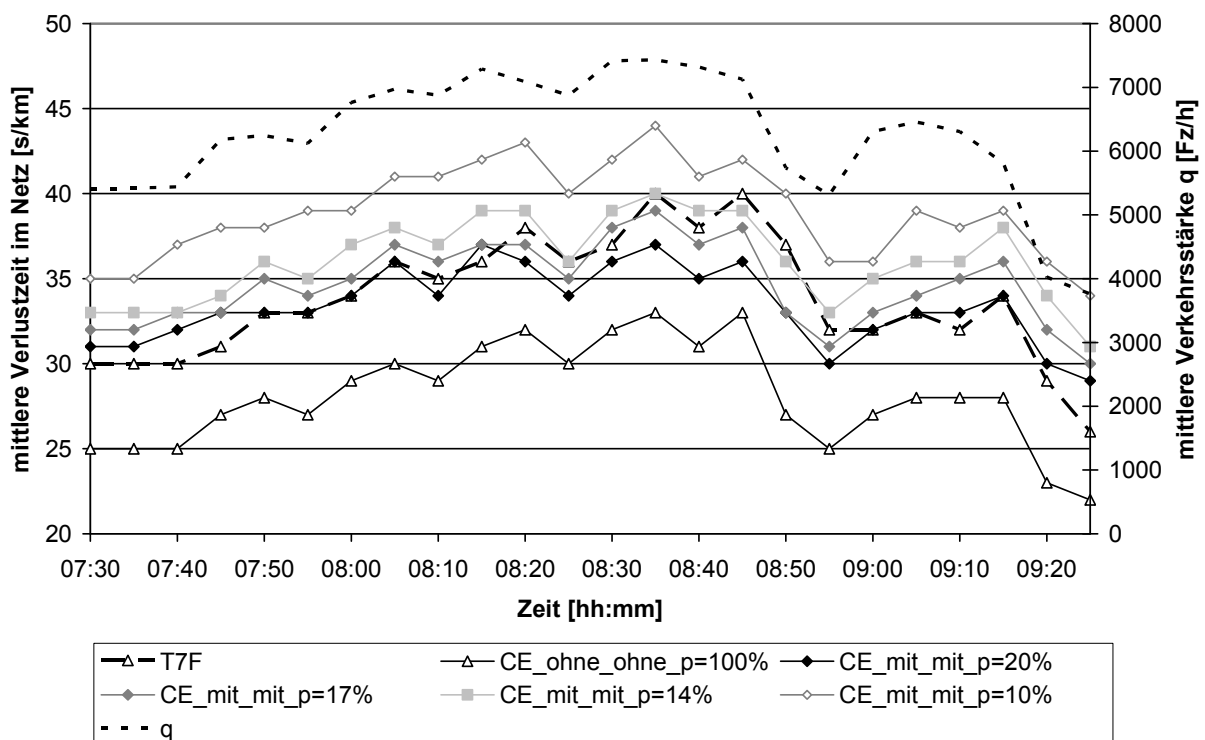


Abbildung 53: Zeitreihe der mittleren Verlustzeit für  $p = 100\%$ ,  $p \leq 20\%$  (Nachfrageszenario 2)

Erwartungsgemäß nehmen die absoluten mittleren Verlustzeiten im Netz auch im Nachfrageszenario 2 mit abnehmendem Anteil an kommunikationsfähigen Fahrzeugen zu. Während bei hohen Penetrationsraten eine Reduzierung der mittleren Verlustzeit im Netz um bis zu 20% mit CE erreicht wird, liegen die mittleren Verlustzeiten ab ca.  $p < 18\%$  unter dem Niveau des Referenzszenarios T7F (vgl. Abbildung 54). Der bereits im Nachfrageszenario 1 festgestellte Qualitätsverlust ab  $p < 14\%$  wird im Nachfrageszenario 2 bestätigt. Die mittlere Verlustzeit im Netz steigt deutlich zwischen  $p = 14\%$  und  $p = 10\%$  von 36s/km auf 39s/km.

Die Analyse der mittleren Haltzeit und Anzahl an Halten im Netz zeigt ein konsistentes Bild zum Nachfrageszenario 1. Während die mittlere Anzahl an Halten mit abnehmender Penetrationsrate nur geringfügig im Vergleich zum Referenzszenario zunimmt (vgl. Abbildung 55), reduziert sich die mittlere Haltzeit im Netz mit CE deutlich um bis zu 20% ( $p \geq 50\%$ ). Auch bei Ausstattungsraten von  $p = 20\%$  kann CE zu einer Reduzierung der Haltzeiten beitragen (vgl. Abbildung 56).

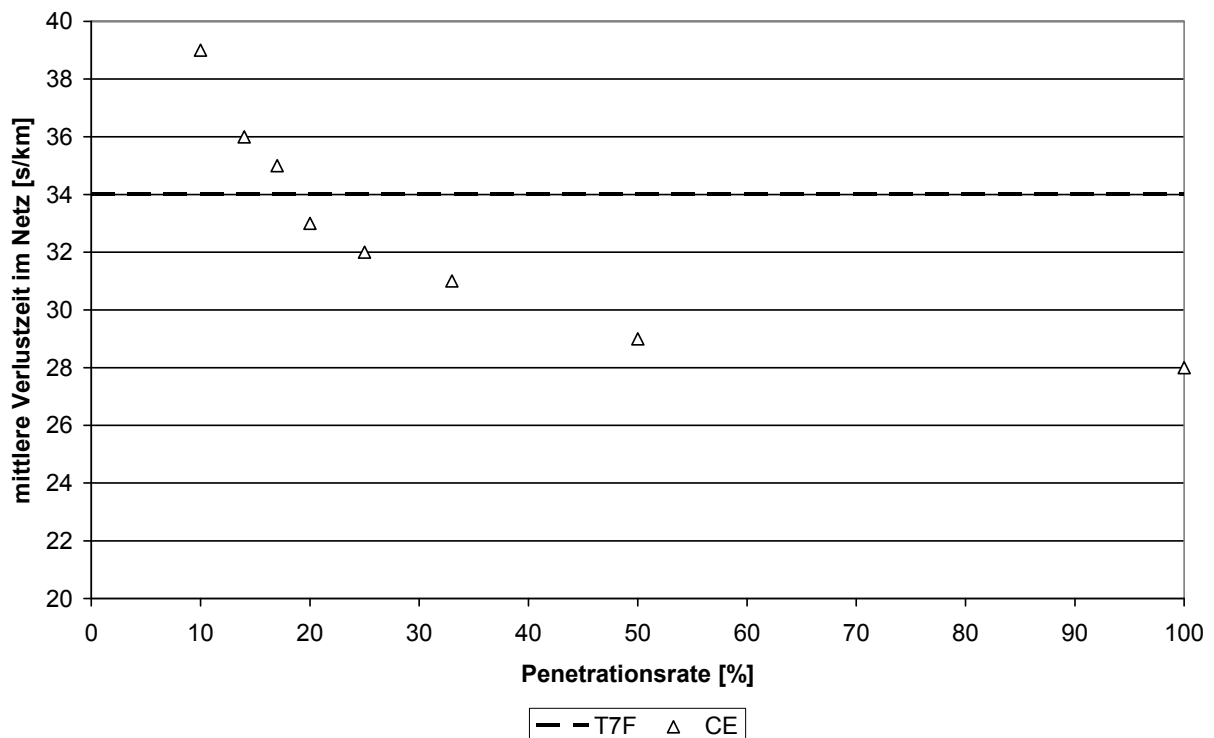


Abbildung 54: Zusammenhang zwischen der mittleren Verlustzeit im Netz und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 2)

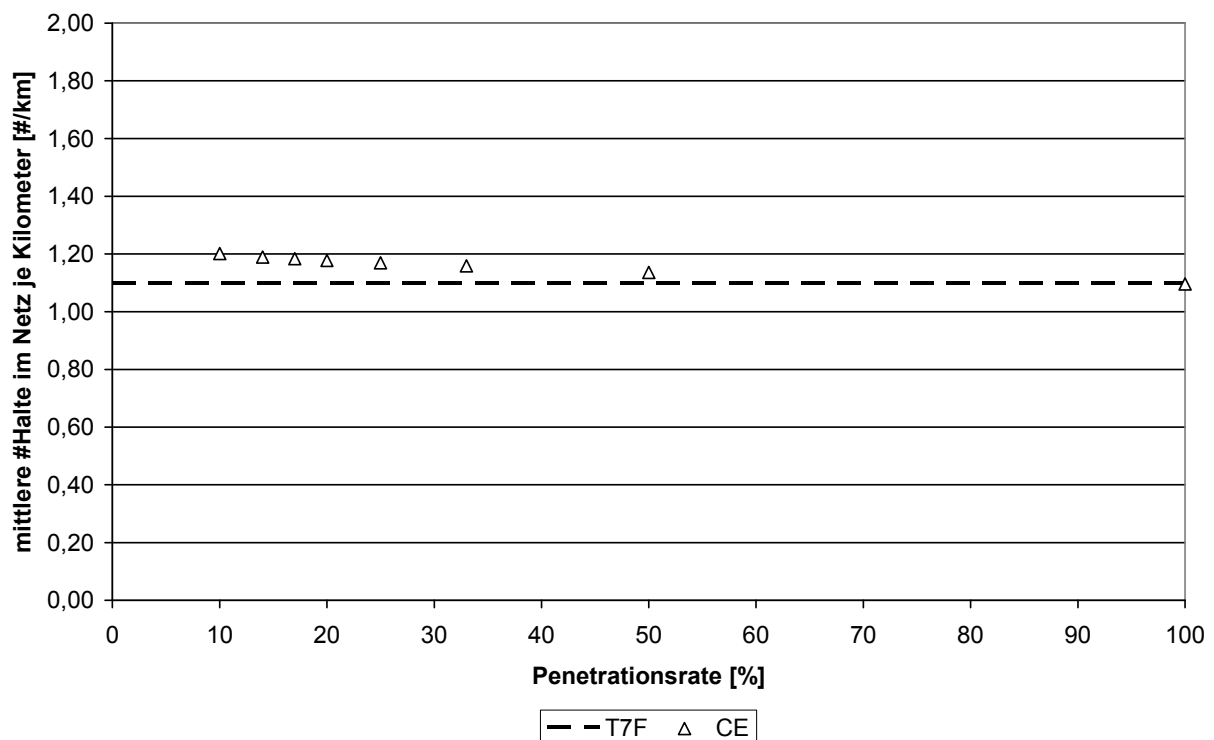


Abbildung 55: Zusammenhang zwischen der mittleren Anzahl an Halten je Kilometer und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 2)

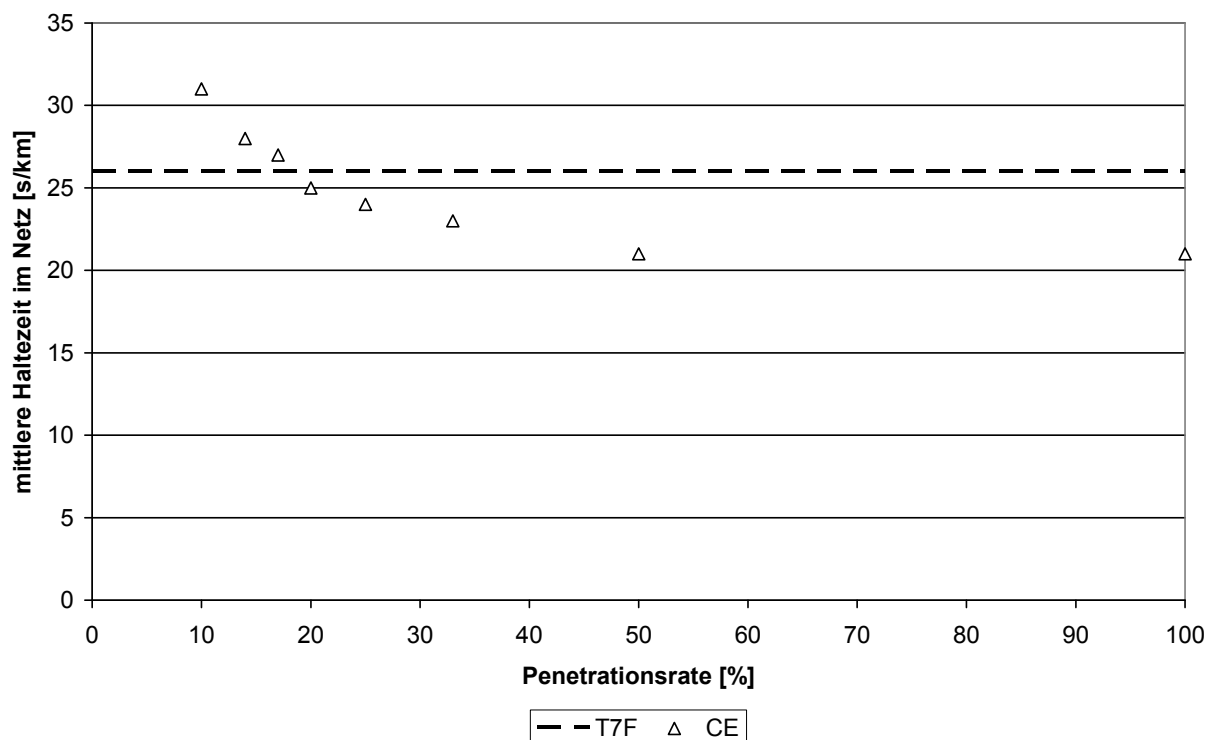


Abbildung 56: Zusammenhang zwischen der mittleren Haltezeit je Kilometer und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 2)

Die dynamische Anpassung der Freigabezeiten innerhalb von CE an die jeweilige Verkehrsnachfrage in den Zufahrten äußert sich erwartungsgemäß in der Reduzierung der Gesamtreisezeit im Netz (Abbildung 57). Bei einer mittleren Penetrationsrate von  $p=25\%$  beträgt die Reduzierung der Reisezeit aller Fahrzeuge im Netz ca. 17h (2,5%) gegenüber T7F. Erwartungsgemäß erzielt CE den höchsten Nutzen, wenn alle Fahrzeuge mit Kommunikationseinheiten ausgestattet sind. Im betrachteten Zeitraum von 07:30-09:30Uhr beträgt die maximale Reduzierung der Gesamtreisezeit ca. 5,5% bzw. 36h ( $p=100\%$ ). Im Vergleich zur Gesamtreisezeit im Nachfrageszenario 1 können bereits bei einer Penetrationsrate von 20% Reisezeiten im Netz mit CE im Vergleich zu T7F eingespart werden.

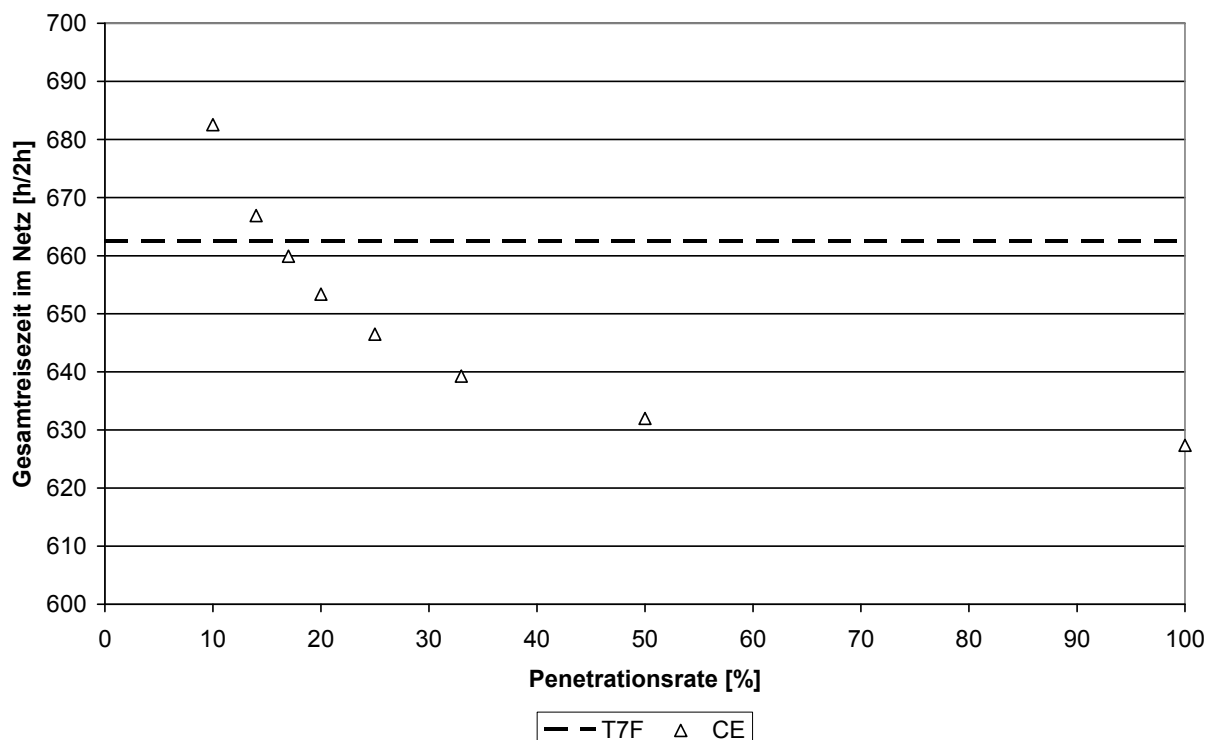


Abbildung 57: Gesamtreisezeit im Netz (Nachfrageszenario 2)

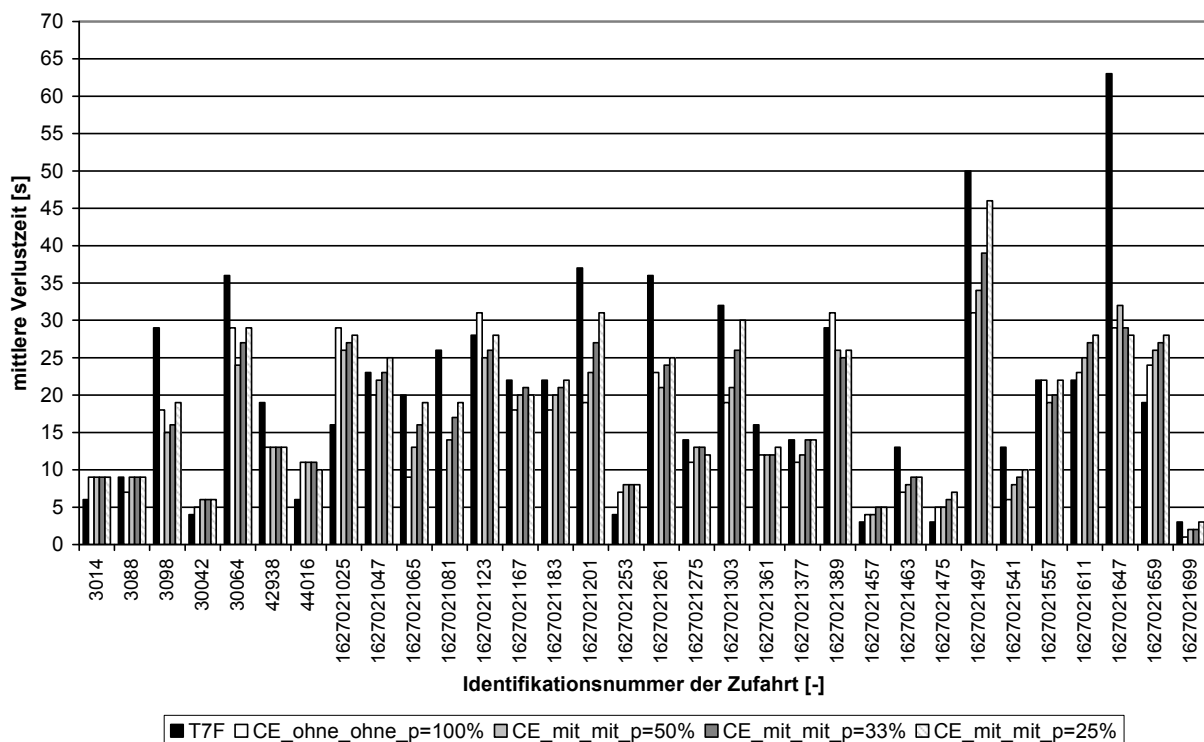
### 7.3.2 Kantenfeine Betrachtung

Trotz einer Zunahme der Verkehrsnachfrage um bis zu 5% im Vergleich zum Nachfrageszenario 1 betragen die mittlere Verlustzeit in allen Zufahrten mit CE auch im Nachfrageszenario 2 weniger als 35s für  $p \geq 50\%$ . Die Qualität des Verkehrsablaufs mit CE entspricht demnach gemäß HBS (FGSV, 2005) QSV A bzw. QSV B. Im Referenzszenario steigen die mittleren Verlustzeiten hingegen auf bis zu 63s (QSV D) deutlich an (vgl. Abbildung 58). In 15% aller Zufahrten entspricht die Qualität des Verkehrsablaufs mit T7F QSV C und QSV D. Die maximale Reduzierung der mittleren Verlustzeit mit CE gegenüber T7F beträgt 35s bzw. 55% in der östlichen Zufahrt am KP Hildesheimer Straße/ Altenbekener Damm (ID: 1627021647). Die deutliche Zunahme der mittleren Verlustzeit resultiert hier aus der nicht vorhandenen Flexibilität der Referenzsteuerung in Form fester Freigabe- und Umlaufzeiten und aus der bereits beschriebenen Problematik der bedingt verträglichen Linksabbiegerströme. Eine deutliche Zunahme der mittleren Verlustzeiten ist zudem innerhalb von Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage zu

beobachten. So nimmt die mittlere Verlustzeit im Referenzszenario innerhalb der Zufahrt 1627021497 im Vergleich zum Nachfrageszenario 1 um 6s zu.

Bestätigt wird dies bei der Betrachtung der mittleren Verlustzeiten in den Nebenrichtungen der drei definierten Hauptrouten. Während die Unterschiede in den mittleren Verlustzeiten zwischen den Nachfrageszenarios 1 und 2 in den Hauptrichtungen (vgl. Tabelle 5 und 7) mit durchschnittlich 1s/km als gering einzustufen sind, können die mittleren Verlustzeiten in den Nebenrichtungen teilweise deutlich verringert werden (vgl. Tabelle 6 und 8). In den Nebenrichtungen der Hauptroute Hildesheimer Straße betragen die Reduzierungen der mittleren Verlustzeiten mit CE im Vergleich zum Referenzszenario in mehreren Zufahrten deutlich mehr als 10s.

Obwohl die modellierten dynamischen Schwankungen im Nachfrageszenario 2 lediglich natürlichen Variationen in der Verkehrsnachfrage innerhalb einer morgendlichen Spitzenverkehrszeit entsprechen, kann CE demnach zu einer deutlichen Reduzierung der mittleren Verlustzeiten beitragen.



**Abbildung 58: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten für  $p \geq 25\%$  (Nachfrageszenario 2)**



**Tabelle 7: Verlustzeitdifferenzen von *CE\_ohne\_ohne* ( $p=100\%$ ) bzw. *CE\_mit\_mit* (50%, 33%, 25%) im Vergleich zu T7F in den Hauptrichtungen der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (Nachfrageszenario 2)**

Haupttrouten	Zufahrt-ID <sup>15</sup>	$\Delta$ mittlere Verlustzeit CE – T7F [s/km]			
	[–]	p=100% (ohne_ohne)	p=50% (mit_mit)	p=33% (mit_mit)	p=25% (mit_mit)
Hildesheimer Straße in Richtung Norden	1627021611	+ 1	+ 3	+ 5	+ 6
	1627021541	- 7	- 5	- 4	- 3
	1627021475	+ 2	+ 2	+ 3	+ 4
Rudolf-von-Bennigsen-Ufer in Richtung Norden	42938	- 6	- 6	- 6	- 6
	3088	- 2	0	0	0
Altenbekener Damm in Richtung Westen	1627021377	- 3	- 2	0	+ 1
	1627021275	- 3	- 1	- 1	- 2
	1627021647	- 34	- 31	- 34	- 35

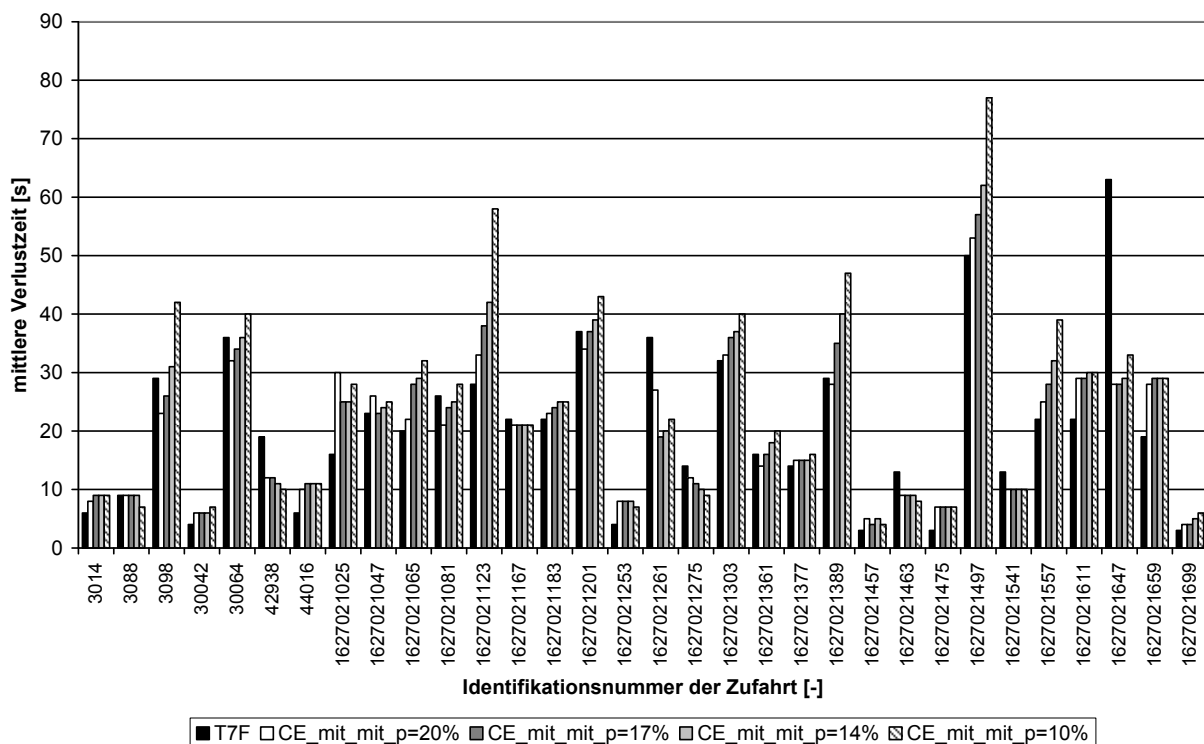
**Tabelle 8: Verlustzeitdifferenzen von *CE\_ohne\_ohne* ( $p=100\%$ ) bzw. *CE\_mit\_mit* (50%, 33%, 25%) im Vergleich zu T7F in den Nebenrichtungen der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (Nachfrageszenario 2)**

Haupttrouten	Zufahrt-ID	$\Delta$ mittlere Verlustzeit CE – T7F [s/km]			
	[–]	p=100% (ohne_ohne)	p=50% (mit_mit)	p=33% (mit_mit)	p=25% (mit_mit)
Hildesheimer Straße in Richtung Norden	1627021647	- 34	- 31	- 34	- 35
	1627021557	0	- 3	- 2	0
	1627021123	+ 3	- 3	- 2	0
	1627021201	- 18	- 14	- 10	- 6
	1627021497	- 19	- 16	- 11	- 4
Rudolf-von-Bennigsen-Ufer in Richtung Norden	3098	- 11	- 14	- 13	- 10
	30064	- 7	- 12	- 9	- 7
Altenbekener Damm in Richtung Westen	1627021361	- 4	- 4	- 4	- 3
	1627021389	+ 2	- 3	- 4	- 3
	1627021303	- 13	- 11	- 6	- 2
	1627021699	- 2	- 1	- 1	0
	1627021611	+ 1	+ 3	+ 5	+ 6
	1627021659	+ 5	+ 7	+ 8	+ 9
	1627021183	- 4	- 2	- 1	0
	1627021167	- 4	- 2	- 1	- 2

<sup>15</sup> Eine Übersicht der verwendeten Identifikationsnummern für Zufahrten enthält Anhang (A 1).

Die Analyse der mittleren Verlustzeiten in den einzelnen Zufahrten im Nachfrageszenario 2 konkretisiert den bereits im Nachfrageszenario 1 beobachteten Qualitätsverlust für  $p \leq 14\%$  (vgl. Abbildung 59). Insbesondere in den Nebenströmen der Hauptrouten steigen die mittleren Verlustzeiten zwischen  $p=14\%$  und  $p=10\%$  deutlich an. So beispielsweise an der Zufahrt Geibelstraße/ Hildesheimer Straße (ID: 1627021123) von 42s auf 58s um nahezu 30%. Die höchsten mittleren Verlustzeiten treten analog zum Nachfrageszenario 1 am KP Hildesheimer Straße/ Krausenstraße auf (vgl. Abbildung 37, KP 421). In der westlichen Zufahrt (ID: 1627021497) beträgt die mittlere Verlustzeit 77s (QSV E). Die Gefahr des Rückstaus in benachbarte Knotenpunkte ist hier gegeben.

Abbildung 59 zeigt auch, dass trotz einer geringer Penetrationsraten von weniger als 20% die mittleren Verlustzeiten bis zu einem Ausstattungsgrad von  $p=14\%$  nahezu konstant ansteigen und es nur zu kontinuierlichen Qualitätsverlusten in Form von Zunahmen in der mittleren Verlustzeit kommt. Ein instabiles Verhalten von CE in Form von stark erhöhten Verlustzeiten, aufgrund des dezentralen Konzepts und dem damit nicht vorhandenen Austausch von Informationen zwischen benachbarten Knotenpunkten kann nicht festgestellt werden. Die Analyse zeigt demnach, dass mit abnehmender Detektionsrate die Qualität von CE zwar deutlich abnimmt, ein instabiles Verhalten und ein damit verbundenes Risiko für Netzzusammenbrüche ist für  $p \geq 14\%$  im Testnetz Hannover-Südstadt nicht zu erwarten. Die minimal benötigte Penetrationsrate für die Anwendung von CE in dem betrachteten Netz liegt demnach bei 14%.



**Abbildung 59: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten für  $p \leq 20\%$  (Nachfrageszenario 2)**

## 7.4 Fazit

Die in Kapitel 5.1 formulierten Ziele für das entwickelte dezentrale, azyklische Steuerungsverfahren konnten erreicht werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse für das Testnetz Hannover-Südstadt zusammengefasst:

- CE nutzt das zukünftig zur Verfügung stehende Datenpotential an fahrzeuggenerierten Kommunikationsdaten sinnvoll und trägt zu einer deutlichen Verbesserung des Verkehrsablaufs in Straßennetzen im Vergleich zu T7F bei.
- Das Verfahren passt sich automatisch und dynamisch verschiedenen Verkehrssituationen an und optimiert entsprechend der aktuellen Verkehrsnachfrage in den Zufahrten die Freigabezeitdauern. Auch unter idealisierten Bedingungen (konstante und bekannte Verkehrsnachfrage) für die Referenzsteuerung T7F kann CE deutliche Verbesserung in Form von verminderten mittleren Verlust-, Halte- und Gesamtreisezeiten erzielen.
- Die Qualität von CE ist maßgeblich abhängig von der Penetrationsrate. Ab einer Penetrationsrate von 20% trägt CE zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses gegenüber T7F im betrachteten Netz bei. Bei hohen Penetrationsraten reduziert CE die mittlere Verlustzeit im Netz um bis zu 30% je Kilometer gegenüber dem Referenzszenario. Der Mindestausstattungsgrad für die Anwendung von CE beträgt in den betrachteten Szenarios 14%. Geringere Penetrationsraten führen zu sehr hohen Verlustzeiten in untergeordneten Strömen. Das Risiko von Rückstaus in benachbarte Knotenpunkte und Netzzusammenbrüchen steigt.
- Trotz des dezentralen Konzepts ohne Austausch von Informationen benachbarter Knotenpunkte im Netz können Koordinierungsstrategien nachweislich sehr gut in CE durch die Gewichtung einzelner Fahrzeugströme (vgl. Abschnitt 5.5.2.3) umgesetzt werden. Der Vergleich der definierten Hauptrouten in CE und T7F zeigt, dass CE im Bereich hoher Penetrationsraten sogar die Koordinierung verbessert und mittlere Verlustzeiten sowohl in der Hauptrichtung als auch in den Nebenrichtungen um bis zu 55% reduziert.
- Die schnelle Anpassung der Freigabezeiten mit CE an die aktuelle Verkehrsnachfrage in den Zufahrten spiegelt sich zudem in der deutlichen Reduzierung der Haltezeit je Kilometer um ca. 5% ( $p=20\%$ ) bzw. 20% ( $p=100\%$ ) wider.
- Die Anzahl an Halten durch CE ist gegenüber T7F nahezu identisch. Für  $p<100\%$  steigt die Anzahl geringfügig an. Dies ergibt sich aus der bewussten Bündelung von Fahrzeugen in Pulks innerhalb T7F einerseits und der schnellen Anpassung von Freigabezeiten in Abhängigkeit der momentanen Verkehrsnachfrage in CE andererseits. Die in CE verwendete Methode zur bedarfsgerechten Bemessung von Freigabezeiten (vgl. Abschnitt 5.5.3.1) ist der zentrale Baustein innerhalb von CE, der ein unerwünschtes Ansteigen der Anzahl an Haltvorgängen verhindert.
- Die entwickelte Methode zur Rückstauschätzung trägt ab einer Penetrationsrate von weniger als 50% zu einer verbesserten Verkehrslageschätzung in CE bei und reduziert die Anzahl an Halten und Verlustzeiten insbesondere in Nebenströmen bei geringen und mittleren Ausstattungsgraden um bis zu 30% gegenüber dem Szenario *CE\_mit Detektordaten\_ohne R-Schätzer*.
- Die Verwendung von Daten haltliniennaher Detektoren ist innerhalb CE ab  $p<50\%$  sinnvoll bzw. ab  $p<33\%$  zwingend erforderlich. Insbesondere in Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage sinkt die Wahrscheinlichkeit für Ankünfte kommunikationsfähiger Fahrzeuge, so dass Halte- und Verlustzeiten für Fahrzeuge ohne Kommunikation stark ansteigen. Es konnte festgestellt werden, dass die Berücksichtigung von Daten haltliniennaher Detektoren maßgeblich zu einem stabilen Verkehrsfluss beiträgt.



## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1 Zusammenfassung**

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen in Straßennetzen entwickelt und im Rahmen einer Simulationsumgebung getestet, welches das zukünftige Potential an fahrzeuggenerierten V2I-Kommunikationsdaten sinnvoll nutzt, um den Verkehrsablauf innerhalb signalisierter Knotenpunkte zu verbessern. Wesentlicher Vorteil zukünftiger V2I-Kommunikationsdaten ist die frühzeitige und kontinuierliche Detektion sich nähernder Fahrzeuge in den einzelnen Zufahrten einer Lichtsignalanlage. Einen hohen Ausstattungsgrad an kommunikationsfähigen Fahrzeugen vorausgesetzt, könnte so erstmals ein Verkehrslagebild kontinuierlich gemessen werden.

Das Steuerungsverfahren wurde entwickelt, um in der Zukunft, nach einer gewissen Marktdurchdringung der neuen Technologie, eine deutliche Verbesserung des Verkehrsflusses innerhalb städtischer Netze zu erzielen. Die Arbeit verfolgt ausdrücklich nicht das Ziel zum Zeitpunkt der Markteinführung bzw. bei sehr geringen Ausstattungsgraden von weniger als 10% einsatzfähig zu sein.

Die Systemarchitektur des Steuerungsverfahrens umfasst je Knotenpunkt folgende vier Komponenten: Onboard-Units in kommunikationsfähigen Fahrzeugen, eine Road Side Unit (Access Point an der Lichtsignalanlage), das eigentliche Steuergerät sowie haltliniennahe Detektoren in jeder Zufahrt. Die Road Side Unit bildet den Kommunikationspartner zu den kommunikationsfähigen Fahrzeugen (WLAN-Verbindung) und dem Steuergerät der Lichtsignalanlage (LAN-Verbindung) und ist damit sowohl systemtechnisch als auch methodisch im Mittelpunkt des Systems. Innerhalb der angenommenen Kommunikationsreichweite von bis zu 280m senden Fahrzeuge, die mit einer Kommunikationseinheit ausgestattet sind, periodisch fahrzeuggenerierte Informationen an die Road Side Unit via IEEE 802.11-Standard. Das Kommunikationsprotokoll umfasst die fahrzeuggenerierten Kenngrößen: Zeit, aktuelle Position, aktuelle Geschwindigkeit, Fahrzeug-Identifikationsnummer und im idealen Fall die Route der Fahrzeuge bzw. den nächsten Abbiegewunsch.

Für das Steuerungsverfahren wurde ein dezentraler Ansatz gewählt. Es erfolgt kein Austausch von Informationen zwischen benachbarten Knotenpunkten oder mit einer übergeordneten taktischen Ebene. Trotz des dezentralen Ansatzes können nachweislich Koordinierungs- und Priorisierungsstrategien mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren für Fahrbeziehungen oder einzelne

Fahrzeuge umgesetzt werden. Die Steuerung jedes Knotenpunkts erfolgt phasenbasiert. Die Zuordnung von Signalgruppen zu Phasen, die Bestimmung von Zwischenzeiten sowie die einzelnen Phasenübergänge werden im Vorhinein planerisch festgelegt. Die Anzahl der möglichen Phasen und Varianten an Phasenübergängen ist nicht beschränkt.

Entsprechend der angestrebten Flexibilität und der dynamischen Anpassung der Freigabezeiten an verschiedene Verkehrsnachfrageszenarios, agiert das entwickelte Verfahren azyklisch ohne Umlaufzeiten, Versatzzeiten oder statische Rahmen für Freigabezeiten und optimiert in Zeitintervallen von wenigen Sekunden die Freigabezeitdauern entsprechend der augenblicklichen Verkehrsnachfrage in den Knotenpunktzufahrten. Im Gegensatz zu heutigen Steuerungsverfahren mit tageszeitabhängigen Festzeitprogrammen oder Rahmensignalplänen, unterliegt die Leistungsfähigkeit des entwickelten Steuerungsverfahrens im geringeren Umfang tageszeitlichen Schwankungen in der Verkehrsnachfrage und passt sich automatisch und dynamisch der augenblicklichen Verkehrsnachfrage an. Obere und untere Grenzen für die Freigabezeitanteile bilden planerisch festgelegte minimale Freigabe- sowie maximale Wartezeiten.

Innerhalb des entwickelten Steuerungsverfahrens ist die globale Zeit unterteilt in kurze Optimierungsintervalle von  $\Delta t = 5\text{s}$ . Aufgrund der angenommenen Kommunikationsreichweite von ca. 280m können zu Beginn jedes Optimierungsintervalls  $\Delta t$  für einen Optimierungshorizont von  $4\Delta t = 20\text{s}$  die zukünftigen Fahrzeugankünfte prognostiziert werden. Die Größe des Optimierungshorizonts entspricht zum einen der Zeit, die ein Fahrzeug bei ungehinderter Fahrt zwischen Eintritt in die Kommunikationsreichweite und Erreichen der Haltlinie bei einer mittleren Geschwindigkeit von 50km/h benötigt. Zum anderen ermöglicht das Zeitfenster von 20s die Integration von Zwischenphasen unter Berücksichtigung der auftretenden Zwischenzeiten für alle Verkehrsarten. Im Rahmen des entwickelten Steuerungsverfahrens wurden jeweils zwei Varianten für den Phasenübergang innerhalb eines Optimierungshorizonts definiert, die sich hinsichtlich ihres zeitlichen Beginns unterscheiden. Gemäß der formulierten Zielfunktion wird diejenige Phasenfolge periodisch gewählt, welche die Gesamtrückstaulänge lokal am Knotenpunkt minimiert.

Das Steuerungsverfahren wurde so konzipiert, dass es sich dynamisch verschiedenen Verkehrsnachfrageszenarios in kürzester Zeit anpasst und Freigabezeitanteile flexibel optimiert. Wesentlich beeinflusst wird die Güte des Steuerungsverfahrens allerdings von der Penetrationsrate. Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift wurde daher eine Methode zur Rückstauschätzung auf Basis von V2I-Kommunikationsdaten entwickelt und getestet, um den zu erwartenden Qualitätsverlust im Bereich geringer und mittlerer Penetrationsraten zu dämpfen. Die Methode schätzt anhand von wenigen kommunikationsfähigen Fahrzeugen innerhalb der Warteschlange sowie Informationen aus der Lichtsignalsteuerung die maximal zu erwartende Rückstaulänge zuverlässig ab. Für die Berücksichtigung von Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage werden zudem Daten haltliniennaher Detektoren für die Verkehrslageschätzung verwendet, um eine entsprechende Verkehrsqualität auch bei geringen Penetrationsraten zu gewährleisten.

Die Generierung von optimierten Schaltbefehlen basiert auf der Definition von drei Modellen im entwickelten Steuerungsverfahren. Innerhalb des *lokalen Verkehrslagemodells* werden die gesendeten Daten kommunikationsfähiger Fahrzeuge empfangen und anhand eines Vergleichs mit den topographischen Informationen der Knotenpunktzufahrten phasendiskreten Warteschlangen zugeordnet. Je Optimierungsintervall  $\Delta t$  werden die empfangenen Daten aggregiert

und stromabwärts propagiert. Die Methode zur Schätzung von maximalen Rückstaulängen auf Basis einzelner kommunikationsfähiger Fahrzeuge ist insbesondere bei geringen und mittleren Ausstattungsraten ein wichtiger Baustein im lokalen Verkehrsmodell. Die Auswertung von Daten bereits stehender Fahrzeuge anhand von Kommunikations- und lokalen Detektordaten vervollständigt das lokale Verkehrslagebild.

Die Informationen aus dem Verkehrslagemodell bilden die Eingangsdaten für das *lokale Wirkungsmodell*. Innerhalb des Wirkungsmodells werden die in den zukünftigen 20s zu erwartenden Rückstaulängen für jede Phase und für jeden zulässigen Phasenwechsel bestimmt. Hierfür ist neben der Kenntnis der detektierten Fahrzeuge in jeder Zufahrt, der aktuellen Freigabe- und Sperrzeiten die Kenntnis der phasendiskreten Serviceraten notwendig. Diese beinhalten, wie viele Fahrzeuge je Optimierungsintervall  $\Delta t$  und Phase an der Lichtsignalanlage bedient werden können.

In Abhängigkeit der Anzahl an Phasen und möglichen Phasenübergängen innerhalb des Optimierungshorizonts entsteht ein Lösungsraum. Für die Bestimmung der optimalen Lösungen innerhalb der Optimierungshorizonte wird die exakte Optimierungsmethode der Vollständigen Enumeration gewählt. Innerhalb der periodisch sich wiederholenden Optimierungshorizonte von 20s wird diejenige Phasenfolge bestimmt, welche zu einer Minimierung der Gesamtrückstaulänge am Knotenpunkt führt. Aufgrund des dezentralen Ansatzes und des kurzen Optimierungshorizonts ist der resultierende Lösungsraum selbst bei komplexeren Phasensteuerungen gering, so dass eine vollständige Enumerierung des Lösungsraums in kurzer Zeit ( $<1s$ ) realisiert werden kann.

Innerhalb des *lokalen Steuerungsmodells* werden zunächst planerische Nebenbedingungen überprüft. Dies sind die einzuhaltenden Mindestfreigabezeiten, die bedarfsgerecht bemessenen Freigabezeiten sowie die planerisch gewählten maximalen Wartezeiten für das jeweilig erste Fahrzeug innerhalb einer Warteschlange. Für die Sicherstellung der maximalen individuellen Wartezeiten werden neben den V2I-Kommunikationsdaten Daten haltliniennaher Detektoren verwendet. Nach Prüfung etwaiger Verletzungen von planerischen Kenngrößen erfolgt die Umsetzung der optimalen Lösung des Wirkungsmodells in Form von Schaltbefehlen. Im Steuergerät werden die generierten Schaltbefehle schließlich umgesetzt und aktuelle Signalstatus wieder an die Road Side Unit zurück gesendet.

Das entwickelte Verfahren wurde in Rahmen von umfangreichen Modelluntersuchungen innerhalb des realen Testnetzes Hannover-Südstadt getestet und bewertet. Das Netz umfasst neun signalisierte und sechs vorfahrtsgeregelte Knotenpunkte. Die Gesamtlänge beträgt ca. 19km. Betrachtet wurde die morgendliche Spitzenverkehrszeit im Zeitraum 07:30-09:30Uhr. Als Simulationstool wurde der mikroskopische Verkehrsflusssimulator AIMSUN NG verwendet. Das entwickelte dezentrale Steuerungsverfahren wurde in der Programmiersprache C++ implementiert und über eine definierte Schnittstelle mit dem Verkehrsflusssimulator verbunden. Als Referenzsteuerung diente eine mit TRANSYT-7F optimierte Festzeitsteuerung.

Im Rahmen der Simulationsuntersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass das entwickelte Steuerungsverfahren die angestrebten Ziele erreicht und unter Nutzung von V2I-Kommunikationsdaten dazu beitragen kann, den städtischen Verkehrsfluss der Zukunft in Form verringerter Verlust-, Halte- und Gesamtreisezeiten deutlich zu verbessern. Insbesondere bei dynamischen Schwankungen in der Verkehrsnachfrage passt sich das entwickelte Verfahren in

kürzester Zeit automatisch der Verkehrsnachfrage in den Zufahrten an und optimiert in kurzen Zeitintervallen die Freigabezeitdauern der einzelnen Phasen. Aber auch unter idealisierten Bedingungen (konstante und bekannte Verkehrsnachfrage) für die Referenzsteuerung Transyt-7F können deutliche Reduzierungen der Gesamtreisezeiten im Netz um bis zu 14,5h in der morgendlichen Spitzenstunde erzielt werden.

Erwartungsgemäß ist die Qualität der neuen Steuerung maßgeblich von der Penetrationsrate abhängig. Ab einer Penetrationsrate von 20% trägt das neue Verfahren zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses gegenüber Transyt-7F in den betrachteten Szenarios bei. Bei hohen Penetrationsraten können die mittleren Verlustzeiten um bis zu ca. 30% je Kilometer gegenüber dem Referenzszenario reduziert werden. Die entwickelte Methode zur Rückstauschätzung trägt ab einer Penetrationsrate von weniger als 50% zu einer verbesserten Verkehrslageschätzung bei und reduziert die mittlere Anzahl an Halten und Verlustzeiten insbesondere in Nebenströmen um bis zu 30%. Die Verwendung von Daten haltliniennaher Detektoren ist ab einer Penetrationsrate von weniger als 33% zwingend erforderlich. Insbesondere in Nebenströmen mit geringer Verkehrsnachfrage sinkt hier die Wahrscheinlichkeit für Ankünfte kommunikationsfähiger Fahrzeuge, so dass Halte- und Verlustzeiten für Fahrzeuge ohne Kommunikation hier deutlich zunehmen.

Der Mindestausstattungsgrad beträgt in den betrachteten Szenarios 14%. Geringere Penetrationsraten führen zu sehr hohen Verlustzeiten in untergeordneten Strömen. Bedingt durch die verminderte Detektionsgüte und einer in der Folge unzureichenden Bemessung der Freigabezeiten, erhöht sich das Risiko stetig anwachsender Rückstaus, die zu einem Blockieren benachbarter Knotenpunktausfahrten führen und in der Folge Netzzusammenbrüche hervorrufen können. Weitere stationäre Detektoren in Verbindung mit etablierten Methoden zur Rückstaulängenschätzung (MÜCK, 2002) könnten die Verkehrslageschätzung bei geringen Penetrationsraten verbessern. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde diese Möglichkeit allerdings nicht betrachtet.

Die Analyse der mittleren Anzahl an Halten je Kilometer und mittleren Haltezeit je Kilometer im Netz zeigt die verkehrliche Wirkung der beiden unterschiedlichen Konzepte von Transyt-7F und des entwickelten azyklischen, dezentralen Steuerungsverfahrens zur Optimierung des innerstädtischen Verkehrsablaufs. Während Transyt-7F anstrebt, Fahrzeuge zunächst in Pulks zu bündeln, um diese auf Basis optimierter Versatzzeiten haltfrei durch das Netz zu lenken, reagiert das entwickelte Steuerungsverfahren unmittelbar auf die augenblickliche Verkehrsnachfrage in den Zufahrten ohne aktive Bündelung von Fahrzeugen zu Pulks. Die hohe Dynamik und Flexibilität des entwickelten azyklischen Steuerungsverfahrens bedingt eine Zunahme der Anzahl an Phasenübergängen und somit eine Zunahme der Dauern von Alles-Rot-Zeiten gegenüber Transyt-7F. Innerhalb des Verfahrens wird die Anzahl an Halten wesentlich von der Strategie der Warteschlangenleerung beeinflusst. Die verwendete Methode zur bedarfsgerechten Bemessung von Freigabezeiten ist ein zentraler Baustein, der dazu führt, dass die mittlere Anzahl an Halten sich nicht deutlich erhöht, sondern im Idealfall einer Penetrationsrate von 100% identisch zum Referenzszenario ist. Für  $p < 100\%$  ist lediglich eine leicht erhöhte Anzahl an Halten in allen Szenarios infolge der verminderten Qualität des Verkehrslagebilds gegenüber Transyt-7F zu beobachten. Die mittlere Haltezeit je Kilometer kann hingegen um 5% ( $p=20\%$ ) bzw. 20% ( $p=100\%$ ) deutlich verringert.



Trotz des dezentralen Konzepts ohne Austausch von Informationen benachbarter Knotenpunkte im Netz können Koordinierungsstrategien sehr gut innerhalb des entwickelten Verfahrens durch die Gewichtung einzelner Fahrzeugströme umgesetzt werden. Der Vergleich der mittleren Verlustzeiten in den Zufahrten der drei existierenden Hauptrouten in der morgendlichen Spitzenverkehrszeit zeigt, dass im Bereich hoher Penetrationsraten sogar die Koordination verbessert und Verlustzeiten sowohl in der Haupt- als auch in den Nebenrichtungen deutlich um bis zu 55% reduziert werden können.

Die Simulationsuntersuchungen haben gezeigt, dass das im Rahmen dieser Dissertationsschrift entwickelte azyklische, dezentrale Steuerungsverfahren das zukünftig zur Verfügung stehende Datenpotential an fahrzeuggenerierten Kommunikationsdaten sinnvoll nutzt. Ab einem Ausstattungsgrad von bereits ca. 20% können Reduzierungen in der Gesamtreisezeit im Netz erzielt werden. Das präsentierte Steuerungsverfahren kann somit einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, nach Einführung einer standardisierten V2I-Kommunikationstechnologie, den städtischen Verkehrsfluss der Zukunft deutlich zu verbessern.

## 8.2 Ausblick

Der Ausblick widmet sich weiterem Forschungsbedarf sowie Erweiterungsmöglichkeiten, um das präsentierte Steuerungsverfahren noch effektiver zu gestalten. Neben weiteren Testläufen des Verfahrens in verschiedenen Straßennetzen mit unterschiedlicher Verkehrsnachfrage, sollten folgende zwei Aspekte im Fokus weiterer Forschung liegen:

### **Detektion der Servicerate**

Aktuell wird die Servicerate für die verschiedenen Signalzustände für jede Phase a priori festgelegt. Die Modelluntersuchungen haben gezeigt, dass es bei dynamischen Schwankungen in der Verkehrsnachfrage schwierig ist, insbesondere für bedingt verträgliche Linksabbiegeströme die Servicerate zuverlässig zu schätzen. In der Folge von Fehlschätzungen erhöht sich das Risiko stetig wachsender Rückstaus, die zu einem Blockieren von Geradeausströmen und schließlich zum Blockieren benachbarter Knotenpunkte führen können. Das bisherige Konzept sieht keine Detektion der Servicerate und damit auch keine Detektion möglicher Störungen (z.B. aufgrund von Unfällen) in den Abflüssen der Knotenpunkte vor. Die Einbeziehung einer gemessenen Servicerate während der Freigabezeiten in das Verfahren kann daher zu einer deutlichen Effizienzsteigerung beitragen.

### **Fahrerassistenz durch Bereitstellung von Restrotzeiten mittels I2V-Kommunikation**

Im Rahmen der Modelluntersuchungen wurde analysiert, dass das dezentrale Steuerungsverfahren bei einer nicht vollständigen Ausstattung aller Fahrzeuge im Netz mit Kommunikationseinheiten zu einem geringfügigen Anstieg der mittleren Anzahl an Halten gegenüber Transyt-7F führt, während die mittleren Haltezeiten deutlich reduziert werden können. Dies lässt die Vermutung zu, dass Phasenübergänge zum Teil nicht vollständig abgeschlossen werden, ehe die sich nähernden Fahrzeuge die Haltlinie bzw. das Ende der Warteschlange erreichen. Die Folge sind (sehr) kurze Haltezeiten bis zum Ende des Phasenübergangs. Ein möglicher Grund hierfür ist die Gewährleistung von Mindestfreigabezeiten für konkurrierende Ströme, die einen Phasenwechsel verzögern können. Die Bereitstellung von Restrotzeiten im Zuge von Phasenübergängen mittels I2V-Kommunikation in das Fahrzeug könnte daher dazu beitragen, die Anzahl an Halten sowie die entstehenden Halte- und Verlustzeiten signifikant zu reduzieren. Der Fahrer

kann so vorausschauender an den Knotenpunkt herankommen und im idealen Fall seine Geschwindigkeit so anpassen, dass ein haltfreies Passieren möglich ist.

Eine kontinuierliche Bereitstellung von zuverlässigen Restrotzeiten ist allerdings ausschließlich im Rahmen von Festzeitsteuerungen möglich. Im Rahmen von verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren sind zuverlässige Aussagen zu Restrotzeiten nur im Zuge von Phasenübergängen möglich. Aufgrund des hohen Dynamisierungsgrads des entwickelten Steuerungsverfahrens ist allerdings zu erwarten, dass allein eine Bereitstellung der Restrotzeiten im Zuge von Phasenübergängen bereits maßgeblich den Verkehrsablauf innerhalb signalisierter Knotenpunkte durch Fahrerassistenz verbessern kann und dazu beiträgt, die Anzahl an Anfahr- und Haltevorgängen zu reduzieren.

## Literatur

- AKCELIK, R., BESLEY, M. (2003) Operating cost, fuel consumption and emission models in aaSIDRA and aaMotion. 25th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR), Adelaide.
- BELL, M.C., BRETHERTON, R.D. (1986) Ageing of fixed-time traffic signal plans. 2nd International Conference on Road Traffic Control, London.
- BELLMAN, R.E. (1952) On the Theory of Dynamic Programming. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 38, 716,
- BELZNER, H (2007) Erkennung von Verkehrsstörungen unter Verwendung erweiterter fahzeuggenerierter Daten. *Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen*. München, Technische Universität München.
- BENMIMOUN, A., CHEN, J., SUZUKI, T. (2007) Design and Practical evaluation of an Intersection Assistant in Real World Tests. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Istanbul.
- BRAUN, R. (2008) Ein echtzeitfähiger Evolutionärer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung. *Lehrstuhl für Verkehrstechnik*. München, Technische Universität München.
- BRAUN, R., KEMPER, C., MENIG, C., et al. (2009) TRAVOLUTION - Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug-Kommunikation. *Straßenverkehrstechnik*, 06/2009.
- BRETHERTON, R.D., RAI, G.I. (1982) The use of SCOOT in low conditions. *Traffic Engineering & Control*, December 1982.
- BRILON, W., GROßMANN, M., BLANKE, H. (1994) *Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen*, Bonn, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 669, Bundesministerium für Verkehr.
- BUSCH, F., KRUSE, G. (1993) MOTION - ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung in Netzen. Tagungsband HEUREKA '93, Karlsruhe.
- CAR-2-CAR-CC (2007) Manifesto. *Overview of the C2C-CC System*.
- CERTU (2001) *Les capteurs video de traffic*, Lyon.
- DAGANZO, C.F., CASSIDY, M.J., BERTINI, R.L. (1999) Possible Explanations of Phase Transitions in Highway Traffic. *Transportation Research A*, Volume 33, S. 365-379.
- DAHSTINEZHAD, S., NADEEM, T., DOROHONCEANU, B., et al. (2004) TrafficView: a driver assistant device for traffic monitoring based on car-to-car communication. IEEE Semi-annual Vehicular Technology Conference, Milan.

- DARWIN, CH. (1858) *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, London.
- DERICHS, H. (1998) Vergleich statistischer Auswerteverfahren experimentell ermittelter Reaktionszeiten von Pkw-Fahrern. Köln, Fachhochschule Köln.
- DREYFUS, S. (2002) Richard Bellman on the birth of dynamic programming. *Operations Research*, vol. 50, pp. 48-51.
- DU, J., BARTH, M. J. (2008) Next-Generation Automated Vehicle Location Systems: Positioning at the Lane Level. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 9, No.1.
- FGSV (2000) Begriffsbestimmung - Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. FGSV-Verlag.
- FGSV (2001) Bemessungsfahrzeuge und Schleppkurven zur Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen. FGSV-Verlag.
- FGSV (2005) *HBS: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen.*, Köln, FGSV Verlag. Ausgabe 2001, Fassung 2005.
- FGSV (2007) *Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA) - Ausgabe 2007 (Entwurf)*, Köln.
- FÖLLING, W. (1994) So funktioniert GPS. Manuskript. *Tele-Media Pressebüro*. München.
- FRANZ, WALTER (2004) Car-to-Car Communication - Anwendungen und aktuelle Forschungsprogramme in Europa, USA und Japan. *VDE-Kongress 2004*. Frankfurt, Band 2: Fachtagungsberichte DGBMT - GMM - GMA.
- FRIEDRICH, B. (1999) Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen. *Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung*. München, Technische Universität München.
- FRIEDRICH, B., HEINRICH, TH., POHLMANN, T. (2007) Ergänzung vorhandener Methoden der Verkehrsdatenerfassung und Verkehrszustandsbewertung durch digitale Videobilddarfassung und -auswertung - Schlussbericht zum FE 03.374/2004. München, TRANSVER GmbH, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau.
- FRIEDRICH, B., KELLER, H. (1994) Balance - a Method for Integrated Traffic and Vehicle Actuated Signal Control. 7. IFAC Symposium, Tianjiin.
- FRIEDRICH, B., SCHMIDT, D. (2009) Aktualisierung und Fortschreibung der Verkehrsnachfragematrizen und des Netzmodells der Region und Landeshauptstadt Hannover - Endbericht. Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Leibniz Universität Hannover.
- FUERSTENBERG, KAY, HOPSTOCK, MATTHIAS, OBOJSKI, ANDRZEJ, et al. (2007) INTERSAFE a PREVENT Project - Final Report.
- GARTNER, N.H. (1982) Demand-responsive decentralised urban traffic control. IN *TRANSPORTATION*, U. D. O. (Ed.).
- GNEDENKO, B. W. (1980) *Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung*, Thun, Verlag Harri Deutsch.
- GRADINESCU, V., GORGORIN, C., DIACONESCU, R., et al. (2007) Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Dublin.
- GREENSHIELDS, B.D., SCHAPIRO, D., ERICKSEN, E.E (1947) Traffic Performance at Urban Street Intersections. *Technical Report*. Yale, Bureau of Highway Traffic.
- HALE, DAVID K. (2005) *TRANSYT-7F - Manual*, Gainesville, University of Florida, McTrans Center.

- HENRY, J.J. (1989) PROLYN tests and future experiment on ZELT. Vehicle Navigation and Information Systems Conference, Toronto, Canada.
- HENRY, J.J., FAGRGES, J.L., TUFFAL, J. (1983) The Prodyn Real Time Traffic Algorithm. IFAC Control in Transportation Systems, Baden-Baden, Bundesrepublik Deutschland.
- HIGASHIKUBO, M., HINENOYA, T., TAKEUCHI, K. (1997) Traffic queue length measurement using an image processing sensor. *Sunimoto Electric Technical Review*, 43.
- HOFFMANN, G (1989) Geschwindigkeitsempfehlungen im Kraftfahrzeug - Ein Beitrag zur Kraftstoffeinsparung durch das Informationssystem "Wolfsburger Welle". *Straßenverkehrstechnik*, Heft 5/ 1989.
- HOFFMANN, G, NIELSEN, S.-M. (1994) Beschreibung von Verkehrsabläufen an signalisierten Knotenpunkten. IN VERKEHR, B. F. (Ed.) *Forschung - Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Bonn.
- HOYER, R., KÜHNEL, C. (2008) Floating Car Observer - Perspektiven seiner Umsetzung. *Heureka '08*. Stuttgart, FGSV-Verlag.
- HUBER, W. (2001) Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen. *Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung* München, Technische Universität München.
- HUNT, P.B., ROBERTSON, D.I., BRETHERTON, R.D. (1981) SCOOT-a traffic responsive method of coordinating signals. *TRRL Laboratory Report 1014*.
- KELLER, H., BOESEFELDT, GARBEN, et al. (1982) Hinweise zur Anwendung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden im Verkehrswesen. *FGSV Schriftenreihe Nr. 113*. Köln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung.
- KÜCKING, T. (2008) Analyse des Verkehrsablaufs an signalisierten Knotenpunkten - wie schnell lösen sich Rückstaus auf? *Studienarbeit*. Hannover, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Leibniz Universität Hannover.
- KUMAR, P. R., SEIDMAN, T. I. (1990) Dynamic instabilities and stabilization methods in distributed real-time scheduling of manufacturing systems. *IEEE Transaction on Automatic Control* 35, Nr. 3, S. 289-298.
- KURT, D., PETER, S. (2006) Traffic intersections of the future. Proceedings of the 21st National Conference on Artificial Intelligence (AAAI 06), Boston.
- LÄMMER, S. (2007) Regelentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken. *Fakultät der Verkehrswissenschaften "Friedrich List"*. Dresden, Technische Universität Dresden.
- LEHNHOFF, N. (2005) Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen. *Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau*. Hannover, Universität Hannover.
- LEICH, A., FLIEß, T., JENTSCH, H.J. (2001) Bildverarbeitung im Straßenverkehr - Überblick über den Stand der Technik. Dresden, Institut für Verkehrsinformationssysteme der Technischen Universität Dresden.
- LITTLE, J. (1961) *A proof for the queueing formula  $L = \lambda * W$* , Cleveland, Ohio, Institute of Technology.
- LÜBKE, A. (2004) Car-to-Car Communication - Technologische Herausforderungen. *VDE-Kongress 2004*. Berlin, Fachtagungsbericht GMM.
- MASUHR, B. (2008) Wenn Autos den sechsten Sinn bekommen. *Hamburger Abendblatt vom 1./2. November*. Hamburg.

- MATHEUS, K., MORICH, R., LÜBKE, A. (2004) Economic Background of Car-to-Car Communication. *IMA 2004 - Informationssystem für mobile Anwendungen*. Braunschweig.
- MATHEUS, K., MORICH, R., PAULUS, I., et al. (2005) Car-to-Car Communication - Market Introduction and Success Factors. *ITS 2005*. Hannover.
- MAUVE, M., HARTENSTEIN, H., FÜßLER, H., et al. (2000) Positionsbasiertes Routing für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen. *it + ti Informationstechnik und Technische Informatik*, 44.
- MENIG, C. (2008) Der informierte Fahrer - Optimierung des Verkehrsablaufs durch LSA-Fahrzeug-Kommunikation. *Heureka '08*. Stuttgart, FGSV-Verlag.
- MENIG, C., BUSCH, F. (2006) Innerstädtische Verkehrsoptimierung durch Car-2-X Communication. 7. Symposium zum Thema Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig.
- MERTZ, J. (2001) Ein mikroskopisches Verfahren zur Verkehrsadaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs. *Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung*. München, Technische Universität München.
- MÜCK, J. (2002) Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren. *Heureka*, Karlsruhe.
- MÜLLER-MERBACH, H. (1973) *Operations Research - Methoden und Modelle der Optimalplanung*, München, Verlag Vahlen.
- OTTO, T., HOYER, R. (2009) Devices-in-the-Loop Approach - Traffic Simulation meets real Devices of distributed V2I Applications. *mobil.TUM – International Scientific Conference on Mobility and Transport*, Munich.
- PAPAGEORGIOU, M. (1991) *Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*, München Wien, R.Oldenbourg Verlag.
- PAPAGEORGIOU, M., DIAKAKI, CH., DINOPOULOU, V., et al. (2003) Review of Road Traffic Control Strategies. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 12
- PRIEMER, CH., FRIEDRICH, B. (2008) A Method For Tailback Approximation Via C2I-Data Based On Partial Penetration. *ITS World Congress*, New York, US.
- RICHTER, A. (2005) *Geschwindigkeitsvorgaben an Lichtsignalanlagen*, Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag.
- ROBERTSON, D.I. (1969) TRANSYT: a traffic network study tool. *RRL Report LR 253*. Berkshire, Road Research Laboratory Crowthorne.
- ROBERTSON, D.I., BRETHERTON, R.D. (1974) Optimum control for an intersection for any known sequence of vehicle arrivals. *Traffic Control and Transportation Systems*.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual*, Washington, D.C.
- TSS, TRANSPORTATION SIMULATION SYSTEMS (2007) *AIMSUN API Manual - Version 5.1.6*, Barcelona.
- WAGNER, P., AMME, F., ERNST, H., et al. (2009) Wirksamkeit einer kooperativen Verkehrssteuerung. *Straßenverkehrstechnik*, 07/2009, 434-441.
- WAGNER, P., BROCKFELD, E., EBENDT, R., et al. (2008) How many FCD are needed for traffic management? 4th International Symposium NETWORKS FOR MOBILITY 2008, Stuttgart, Germany.
- WARDROP, B.A., CHARLESWORTH, G. (1954) A Method of Estimating Speed and Flow of Traffic from a Moving Vehicle. *Institution of Civil Engineerings 3 - Part II*. London.
- WEBSTER, F.V. (1958) Traffic Signal Settings. *Road Research Technical Paper*, vol.39.

- WILLUMSEN, L.G. (1981) An Entropy Maximising Model for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts. Leeds, University of Leeds.
- WISCHHOF, L., EBNER, A., GANSEN, T. (2008) Increasing Mobility and Comfort by Car-to-Car Communication: Applications for Market Introduction. *FISITA 2008 World Automotive Congress*. München.
- WREN, C.M., HUTCHINSON, P.M. (2004) Recent Advances in Vision based Detection Technology for Traffic Applications. 12th IEE International Conference on Road Transport Information & Control, London.
- WU, J., ABBAS-TURKI, A., CORREIA, A., et al. (2007) Discrete Intersection Signal Control. Proceedings of the IEEE International Conference on Service Operations and Logistics and Informatics, Philadelphia.
- ZHENG, JIANYANG, WANG, YINHAI, NIHAN, NANCY L., et al. (2006) Detecting Cycle Failures at Signalized Intersections Using Video Image Processing. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21, p. 425-435.
- ZIMDAHL, W. (1983) Wolfsburg Welle - Ein Projekt der Volkswagen Forschung. Wolfsburg, Volkswagen Forschung.





## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauflogik einer regelbasierten Steuerung (FGSV, 2007) .....	8
Abbildung 2: Modellbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens (FGSV, 2007).....	9
Abbildung 3: Verkehrsflussprofile in SCOOT (HUNT, ROBERTSON, BRETHERTON, 1981) ...	11
Abbildung 4: Lokale Recheneinheit innerhalb eines dezentralen Verfahrens (LÄMMER, 2007)	14
Abbildung 5: Empirische Untersuchungen zum Anfahrverhalten (GREENSHIELDS, SCHAPIRO, ERICKSEN, 1947).....	15
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der maximalen Staulänge $L$ [Fz] und dem geglätteten Stau-Kennwert $\delta$ [-] (MÜCK, 2002) .....	16
Abbildung 7: Kategorisierung von V2X-Applikationen nach monetären Kosten und benötigter Penetrationsrate (MATHEUS, MORICH, LÜBKE, 2004) .....	20
Abbildung 8: Elemente der „Wolfsburger Welle“: Anzeige der Relativposition und Geschwindigkeitsempfehlung (links), IR-Empfänger im Fahrzeug (mitte), IR-Sender an der LSA (ZIMDAHL, 1983).....	23
Abbildung 9: Systemarchitektur Rotlichtassistent (FUERSTENBERG, HOPSTOCK, OBOJSKI et al., 2007) .....	23
Abbildung 10: Systemarchitektur des Projektes Travolution (links), Restrotanzeige (mitte), Geschwindigkeitsempfehlung (rechts) (MENIG, 2008) .....	25
Abbildung 11: Visualisierung von Lichtsignalanlagen - Informationen in AKTIV-VM (OTTO, HOYER, 2009) .....	26
Abbildung 12: Darstellung des Nutzens von Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikationsdaten bei hohen Ausstattungsraten in Form einer kontinuierlich detektierbaren Verkehrslage in Kombination mit georeferenzierter Infrastruktur.....	28
Abbildung 13: Prognose der Fahrzeugdurchdringung (MATHEUS, MORICH, LÜBKE, 2004) ...	30
Abbildung 14: Komponenten des GPS-Systems (FÖLLING, 1994) (links); Komponenten des DGPS-Verfahrens (HUBER, 2001) (rechts) .....	32
Abbildung 15: Lösungsraum einer zweidimensionalen Entscheidungsproblems ohne Nebenbedingungen bei einem Zeithorizont von 10 Schritten bzw. 100s (FRIEDRICH, 1999).....	34
Abbildung 16: Prinzip des Verfahrens DYPIC (ROBERTSON, BRETHERTON, 1974) .....	39
Abbildung 17: Schematische Darstellung des verwendeten Optimierungsverfahren: Vollständige Enumeration.....	44
Abbildung 18: Entscheidungsbaum für eine 3-Phasensteuerung .....	47

Abbildung 19: Systemarchitektur des entwickelten Steuerungsverfahrens mit den vier Bausteinen je signalisiertem Knotenpunkt: Onboard-Units (OBUs) in kommunikationsfähigen Fahrzeugen, einer Road Side Unit (RSU), einem Steuergerät und haltliniennahen Detektoren in jeder Zufahrt. Innerhalb der RSU sind die Prozess innerhalb der drei verwendeten Modelle: lokales Verkehrsmodell, lokales Wirkungsmodell und lokales Steuerungsmodell schematisch dargestellt. ....	50
Abbildung 20: Regelkreis der lokalen Steuerung .....	51
Abbildung 21: Fahrstreifenmatching und Distanzbestimmung bei nichtlinearen Linienverläufen.....	53
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Teillängen $L_1$ und $L_2$ .....	54
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Ankunftsrate $\lambda_1$ und $\lambda_2$ .....	56
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Blocking Time $t_b$ als Zeitdifferenz zwischen Beginn der Freigabezeit und dem tatsächlichem Anfahren .....	57
Abbildung 25: Darstellung der Blocking Time in Abhängigkeit zur Distanz des betrachteten Fahrzeuges zur Haltlinie (KÜCKING, 2008) .....	58
Abbildung 26: Testfeld für die Bewertung der Methode zur Rückstauschätzung im Labor: Festzeitgesteuerte Lichtsignalanlagen im Zuge der B47 im Bereich der AS Bensheim.....	59
Abbildung 27: Auszug aus der Datenanalyse zur Bewertung der Methode zur Rückstauschätzung .....	60
Abbildung 28: Zusammenhang zwischen der Fehlschätzung der Ankunftsrate $\Delta\lambda_2$ und dem hieraus resultierenden Schätzfehler $\Delta L$ .....	61
Abbildung 29: Schätzgüte der Methode zur Rückstaulängenschätzung anhand einer Stichprobe von 212 zu schätzenden Rückstaulängen. Gegenüberstellung der realen und geschätzten Rückstaulängen; Bewertung der Schätzgüte anhand von zwei gewählten Fehlertoleranzen: 10m (~1-2 Fahrzeuge, 20m (~3-4 Fahrzeuge) .....	61
Abbildung 30: Schematische Darstellung zur Integration der Methode zur Rückstauschätzung in das entwickelte Steuerungsverfahren (vgl. Abbildung 19).....	63
Abbildung 31: Schematische Darstellung zur Propagierung von kommunikationsfähigen Fahrzeugen bei Freigabe- und Sperrzeit (Prinzip des Gleitenden Horizonts) .....	64
Abbildung 32: Entscheidungsbaum für eine dreiphasige Steuerung in detaillierter Form.....	68
Abbildung 33: Schematische Darstellung der betrachteten Optimierungshorizonte bei Phasenübergängen und bei Phasenverbleib .....	68
Abbildung 34: Darstellung möglicher Varianten für Phasenübergänge innerhalb einer 2-Phasensteuerung. Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich ihres zeitlichen Beginns.....	70
Abbildung 35: Schematische Darstellung der Prozesse innerhalb des lokalen Steuerungsmodells anhand einer 2-Phasensteuerung (Phasen a und b) .....	74
Abbildung 36: Simulationsumgebung AIMSUN NG .....	75
Abbildung 37: Darstellung des Testnetzes Hannover - Südstadt .....	77
Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung der modellierten Reaktionszeiten (DERICHS, 1998).....	79
Abbildung 39: Testnetz Hannover-Südstadt als Knoten-Kanten Modell in TRANSYT-7F .....	81
Abbildung 40: Regelkreis des Steuerungsverfahrens innerhalb der Simulationsumgebung AIMSUN NG (vgl. Abbildung 20) .....	83
Abbildung 41: Mittlere Verkehrsstärken im Testnetz Hannover-Südstadt für den Zeitraum 07:30-08:30 Uhr(Nachfrageszenario 1) .....	88

Abbildung 42: Zusammenhang zwischen der mittleren Verlustzeit [s/km] und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 1) .....	89
Abbildung 43: Darstellung des Nutzens der Methode zur Rückstauschätzung für Nebenströme anhand des Vergleichs der mittleren Verlustzeit je Kilometer in den Szenarios CE_mit_mit und CE_mit Detektordaten_ohne_R-schätzer für $p \leq 33\%$ .....	90
Abbildung 44: Darstellung des Nutzens der Methode zur Rückstauschätzung für Nebenströme anhand des Vergleichs der mittleren #Halte je Kilometer in den Szenarios CE_mit_mit und CE_mit Detektordaten_ohne_R-schätzer für $p \leq 33\%$ .....	91
Abbildung 45: Zusammenhang zwischen der mittleren Anzahl an Halten je Kilometer und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 1) .....	92
Abbildung 46: Zusammenhang zwischen der mittleren Haltezeit je Kilometer und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 1) .....	92
Abbildung 47: Gesamtreisezeit im Netz (Nachfrageszenario 1) .....	93
Abbildung 48: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten für $p \geq 25\%$ (Nachfrageszenario 1) .....	96
Abbildung 49: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten für $p \leq 20\%$ (Nachfrageszenario 1) .....	99
Abbildung 50: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten im Nachfrageszenario 1 für CE $p=14\%$ und CE_ohne_ohne ( $p \leq 25\%$ ) .....	100
Abbildung 51: Mittlere Verkehrsstärke im Testnetz Hannover-Südstadt für den Zeitraum 07:30-09:30 Uhr (Nachfrageszenario 2) .....	101
Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der mittleren Verlustzeit für $p \geq 25\%$ (Nachfrageszenario 2) .....	102
Abbildung 53: Zeitreihe der mittleren Verlustzeit für $p=100\%$ , $p \leq 20\%$ (Nachfrageszenario 2) .....	102
Abbildung 54: Zusammenhang zwischen der mittleren Verlustzeit im Netz und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 2) .....	103
Abbildung 55: Zusammenhang zwischen der mittleren Anzahl an Halten je Kilometer und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 2) .....	104
Abbildung 56: Zusammenhang zwischen der mittleren Haltezeit je Kilometer und der Penetrationsrate (Nachfrageszenario 2) .....	104
Abbildung 57: Gesamtreisezeit im Netz (Nachfrageszenario 2) .....	105
Abbildung 58: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten für $p \leq 20\%$ (Nachfrageszenario 2) .....	106
Abbildung 59: Kantenfeine Betrachtung der mittleren Verlustzeiten für $p \leq 20\%$ (Nachfrageszenario 2) .....	108



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Benötigte Penetrationsraten für ausgewählte Applikationen (MATHEUS, MORICH, PAULUS et al., 2005).....	29
Tabelle 2: Gewählte Parameter für die Modellierung des Verkehrsflusses (Typ Pkw) .....	79
Tabelle 3: Parameter für Genetischen Algorithmus (GA) im Referenzszenario .....	81
Tabelle 4: Modellierte Verkehrsnachfrage.....	85
Tabelle 5: Verlustzeitdifferenzen von <i>CE_ohne_ohne</i> ( $p = 100\%$ ) bzw. <i>CE_mit_mit</i> (50%, 33%, 25%) im Vergleich zu T7F in den Hauptrichtungen der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (Nachfrageszenario 1).....	97
Tabelle 6: Verlustzeitdifferenzen von <i>CE_ohne_ohne</i> ( $p = 100\%$ ) bzw. <i>CE_mit_mit</i> (50%, 33%, 25%) im Vergleich zu T7F in den Nebenrichtungen der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (Nachfrageszenario 1).....	98
Tabelle 7: Verlustzeitdifferenzen von <i>CE_ohne_ohne</i> ( $p=100\%$ ) bzw. <i>CE_mit_mit</i> (50%, 33%, 25%) im Vergleich zu T7F in den Hauptrichtungen der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (Nachfrageszenario 2).....	107
Tabelle 8: Verlustzeitdifferenzen von <i>CE_ohne_ohne</i> ( $p=100\%$ ) bzw. <i>CE_mit_mit</i> (50%, 33%, 25%) im Vergleich zu T7F in den Nebenrichtungen der drei definierten Hauptrouten: Hildesheimer Straße, Rudolf-von-Bennigsen-Ufer und Altenbekener Damm (Nachfrageszenario 2).....	107



## Anhang

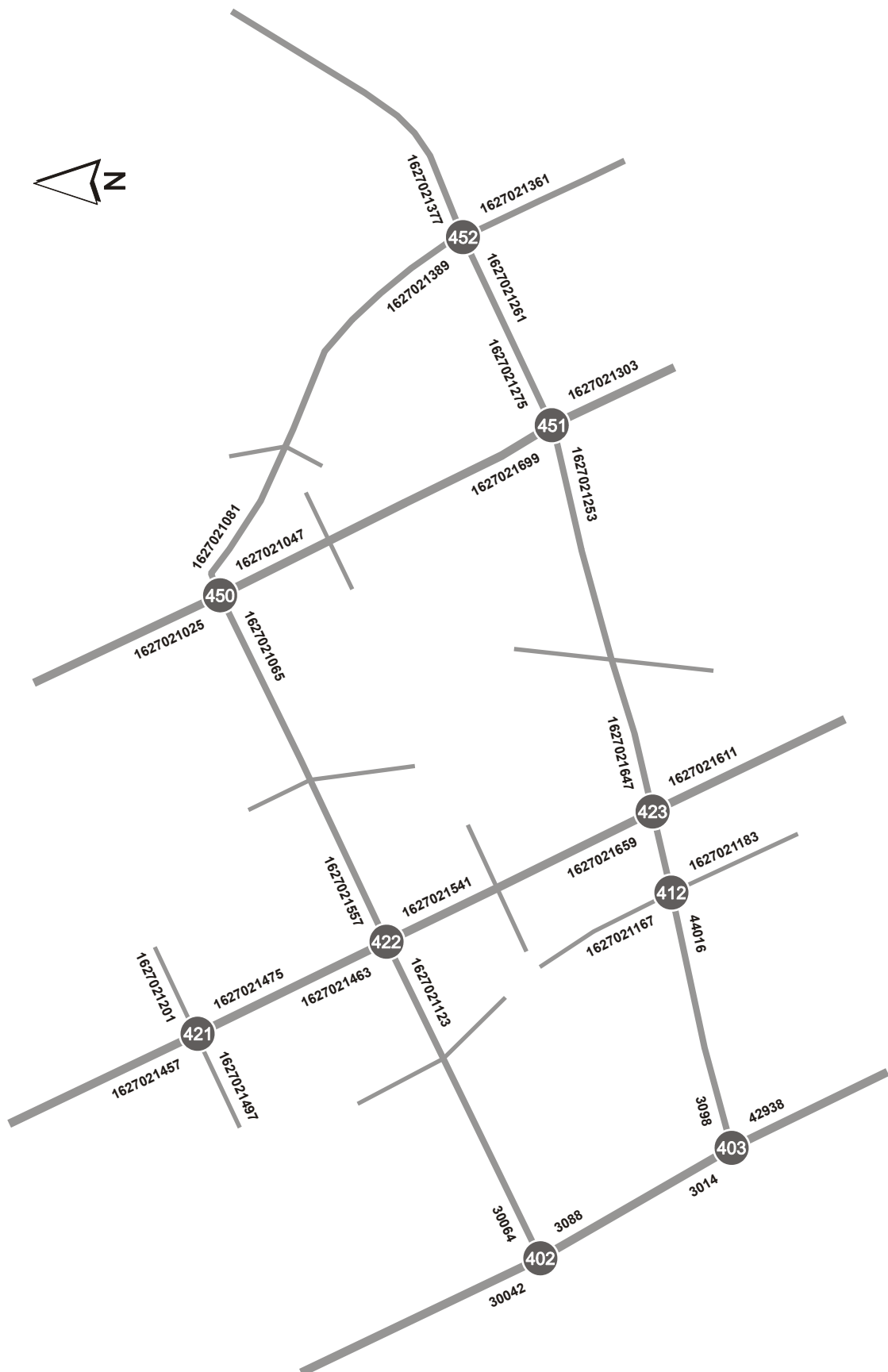




## Verzeichnis des Anhangs

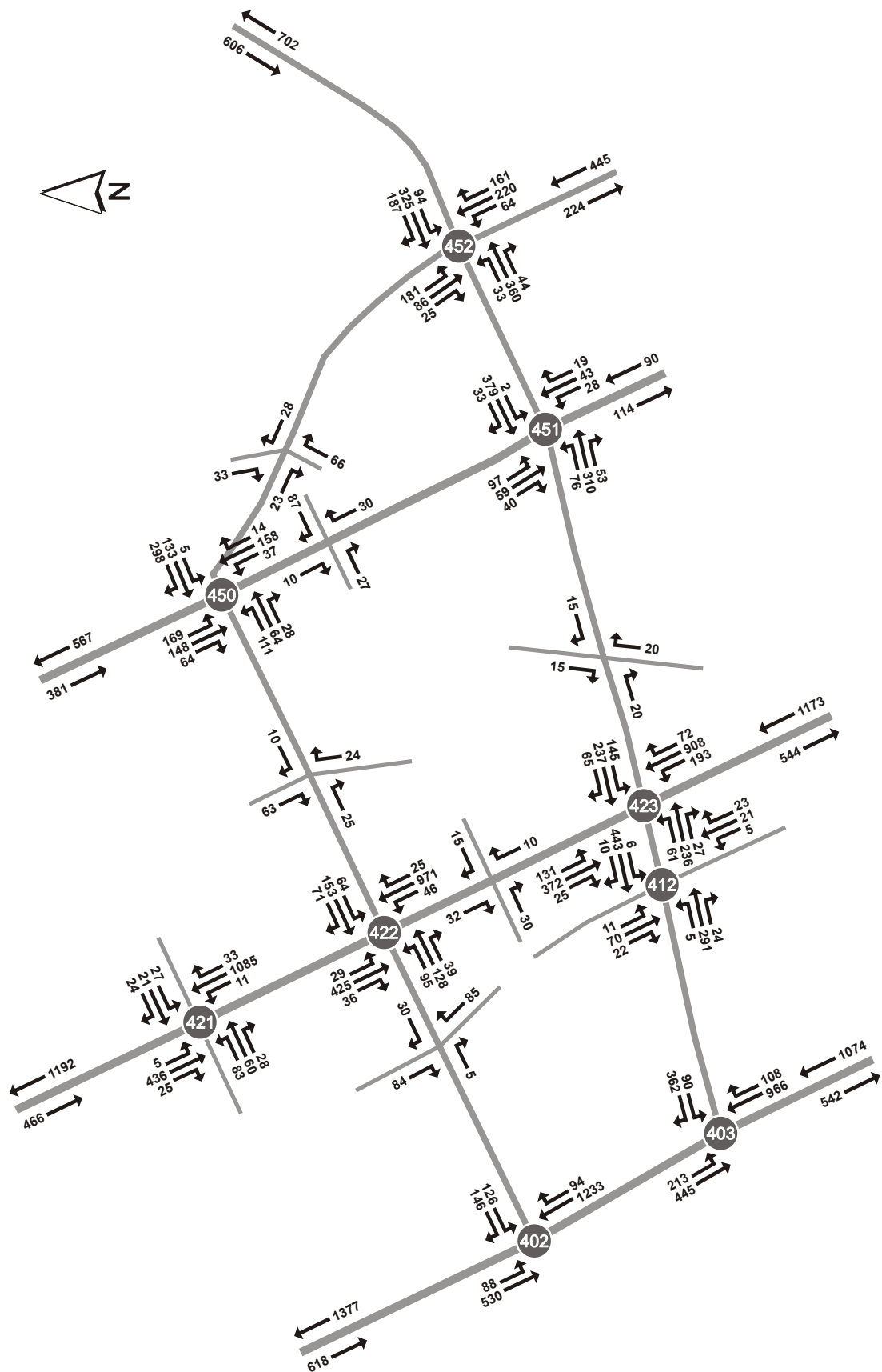
A 1	Kantenbezeichnung des Testnetzes .....	132
A 2	Modellierte Verkehrsstärken im Nachfrageszenario 1 .....	133
A 3	Optimierung der Festzeitsteuerung mit TRANSYT-7F .....	134
A 4	Optimierte Festzeitprogramme in TRANSYT-7F .....	135
A 5	Steuerungsverfahren CE für KP 403 .....	137
A 6	Steuerungsverfahren CE für KP 402 .....	139
A 7	Steuerungsverfahren CE für kombinierten KP 412 und 423 .....	141
A 8	Steuerungsverfahren CE für KP 422 .....	146
A 9	Steuerungsverfahren CE für KP 421 .....	148
A 10	Steuerungsverfahren CE für KP 450 .....	150
A 11	Steuerungsverfahren CE für KP 451 .....	152
A 12	Steuerungsverfahren CE für KP 452 .....	154

## A 1 Kantenbezeichnung des Testnetzes



A 2

Modellierte Verkehrsstärken im Nachfrageszenario 1



### A 3 Optimierung der Festzeitsteuerung mit TRANSYT-7F

TRANSYT-7F Release 10.2 -- Genetic Algorithm optimization

File X:\projekte\02\_laufend\aktiv\091126\_Diss\_sim\_final\100118\_T7F.tin  
Simulation Engine: TRANSYT-7F

#### Genetic Algorithm Input Parameters

```

-----
Crossover Probability (%):          30
Mutation Probability (%):           1
Convergence Threshold (%):          0,01
Maximum Number of Allowable Generations: 300
Actual Number of optimization Generations: 300
Population Size:                     20
Random Number Seed:                  7783
Elitist Method:                       True
Objective Function:                   Disutility Index

```

#### Optimization Results (Cycle Length, splits, and offsets)

```

-----
Node  Cycle      Offset  NS Phasing  EW Phasing
      Init Final  Init Final  Init Final  Init Final
403   90   90    22   67    ---    ---    ---    ---
402   90   90    11   11    ---    ---    ---    ---
412   90   90    44   44    ---    ---    ---    ---
423   90   90     1    1    ---    ---    ---    ---
422   90   90    74   74    ---    ---    ---    ---
421   90   90    88   88    ---    ---    ---    ---
451   90   90    54   53    ---    ---    ---    ---
450   90   90     0    0    ---    ---    ---    ---
452   90   90    32   32    ---    ---    ---    ---

```

```

Node  Split #1  Split #2  Split #3  Split #4
      Init Final  Init Final  Init Final  Init Final
403   19   19    45   45    26   26
402   15   15    64   64    11   11
412   36   36    54   54
423   25   24    51   52    14   14
422   51   51    39   39
421   71   71    19   19
451   34   34    11   10    32   34    13   12
450   24   26    11   11    45   43    10   10
452   47   47    11   11    32   32

```

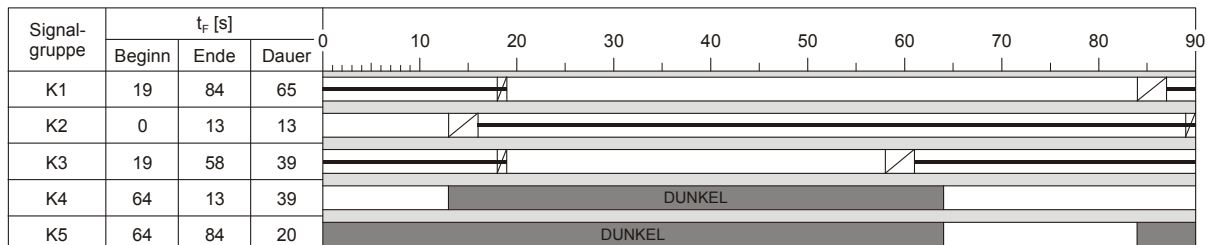
	Control Delay (sec/veh)	Total Stops (%)	Fuel Consumption (lit/hr)	Travel Time (veh-hr/hr)	Performance Index
Initial	20.9	55	1054	225	92.99
Final	20.7	55	1053	224	92.27

The final solution originated in generation #291  
To obtain detailed output, process the punch file:  
100118\_T7F.pun

#### A 4 Optimierte Festzeitprogramme in TRANSYT-7F

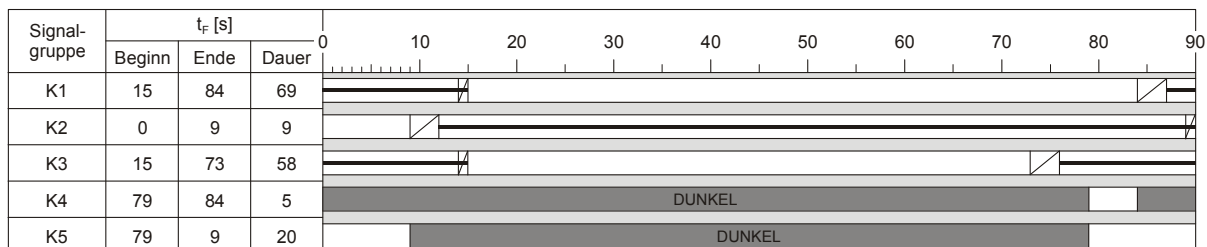
KP 403: Rudolf-von-Bennigsen-Ufer / Altenbekener Damm

Versatzzeit: 67 s



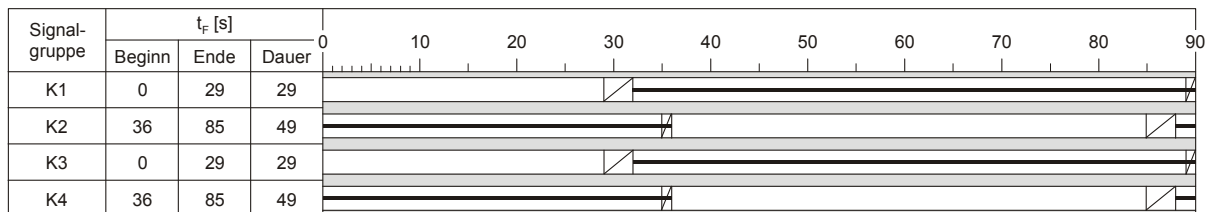
KP 402: Rudolf-von-Bennigsen-Ufer / Geibelstraße

Versatzzeit: 11 s



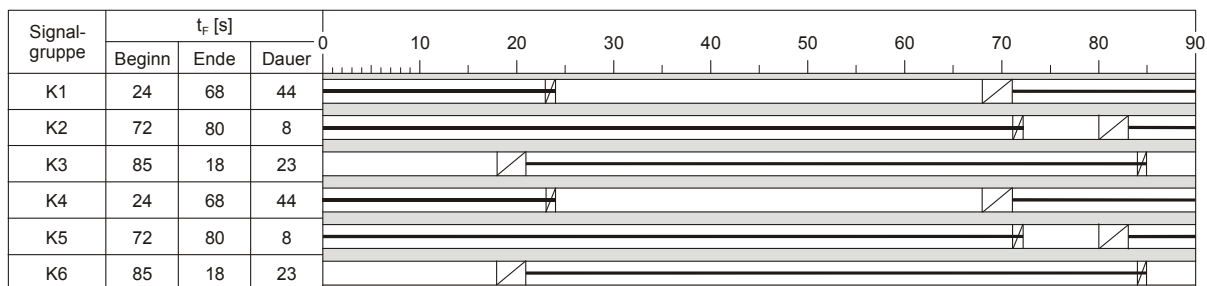
KP 412: Altenbekener Damm / Alte Döhrener Straße

Versatzzeit: 44 s



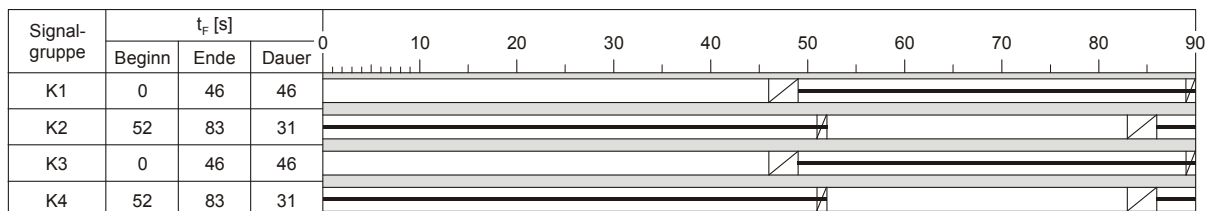
KP 423: Hildesheimer Straße / Altenbekener Damm

Versatzzeit: 1 s



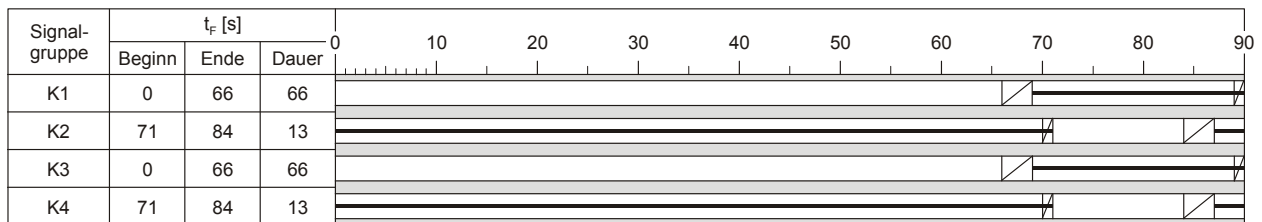
KP 422: Hildesheimer Straße / Geibelstraße

Versatzzeit: 74 s



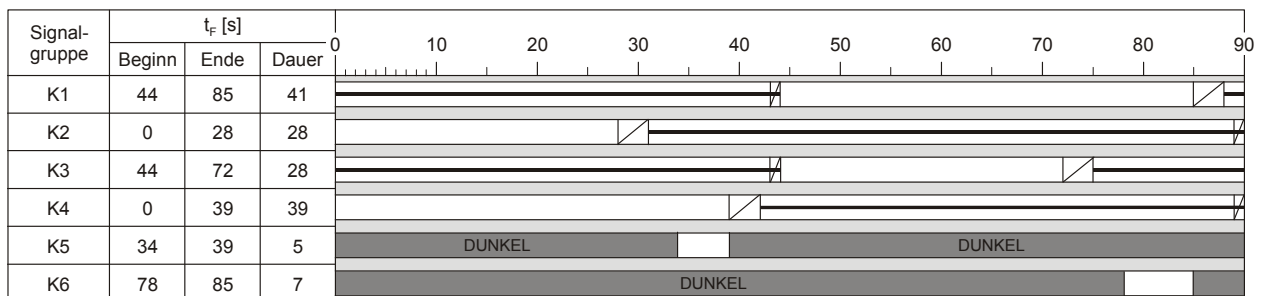
## KP 421: Hildesheimer Straße / Krausenstraße

Versatzzeit: 88 s



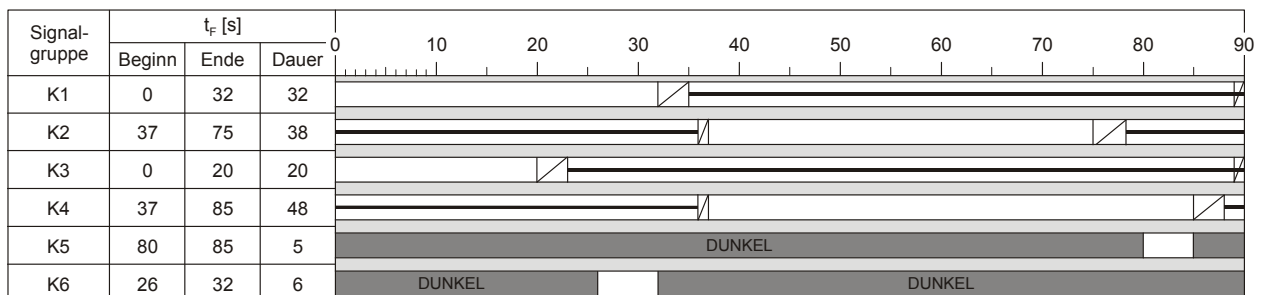
## KP 450: Sallstraße / Geibelstraße

Versatzzeit: 53 s



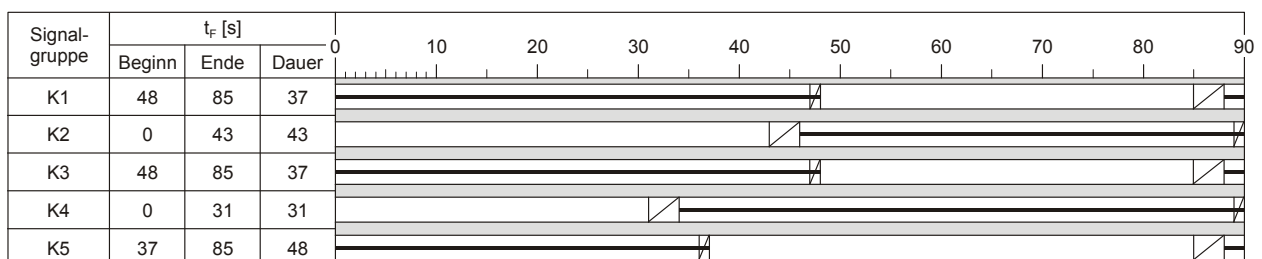
## KP 451: Altenbekener Damm / Stresemannallee

Versatzzeit: 0 s



## KP 452: Altenbekener Damm / Jordanstraße

Versatzzeit: 32 s



GRÜN

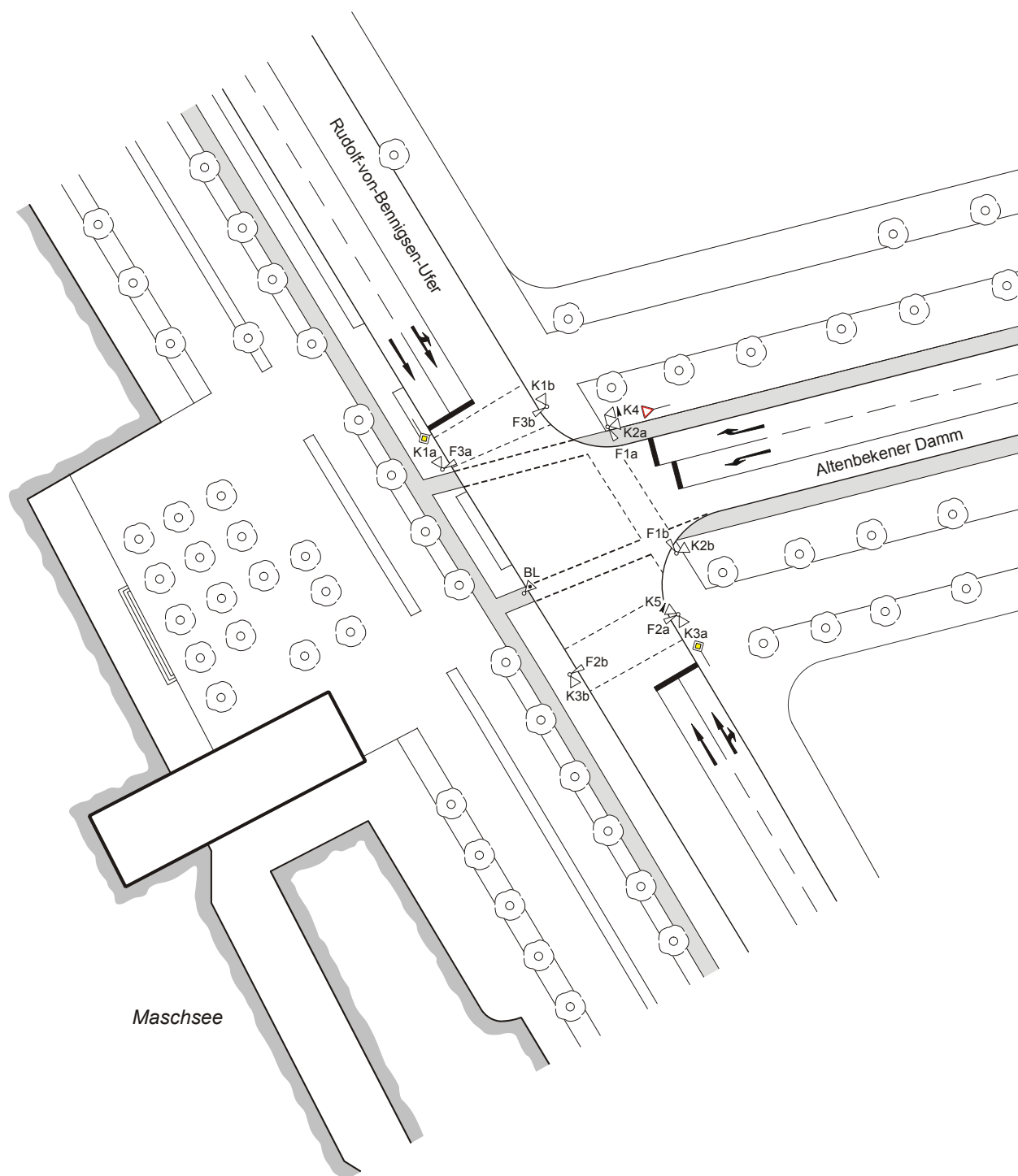
ROT

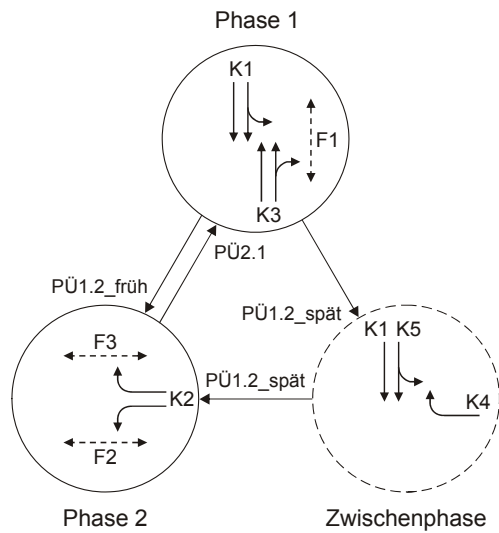
DUNKEL

GELB

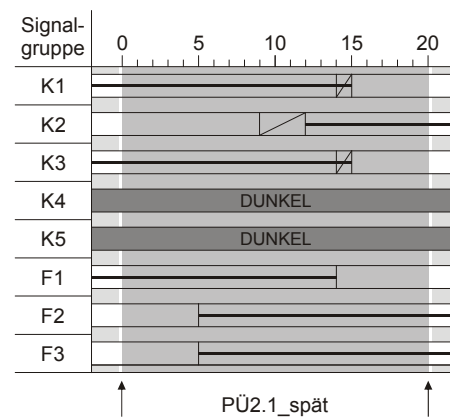
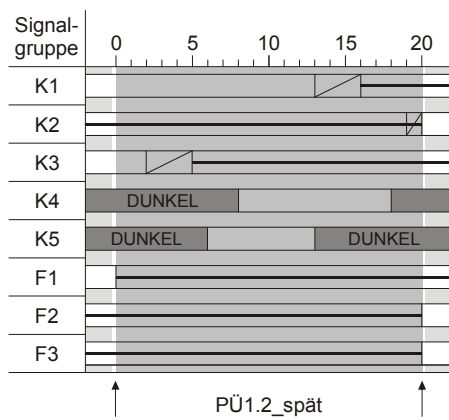
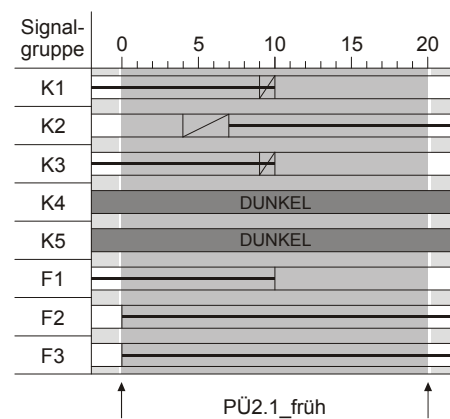
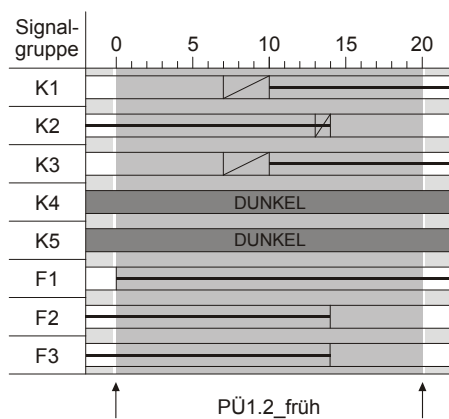
ROT/GELB

## A 5 Steuerungsverfahren CE für KP 403



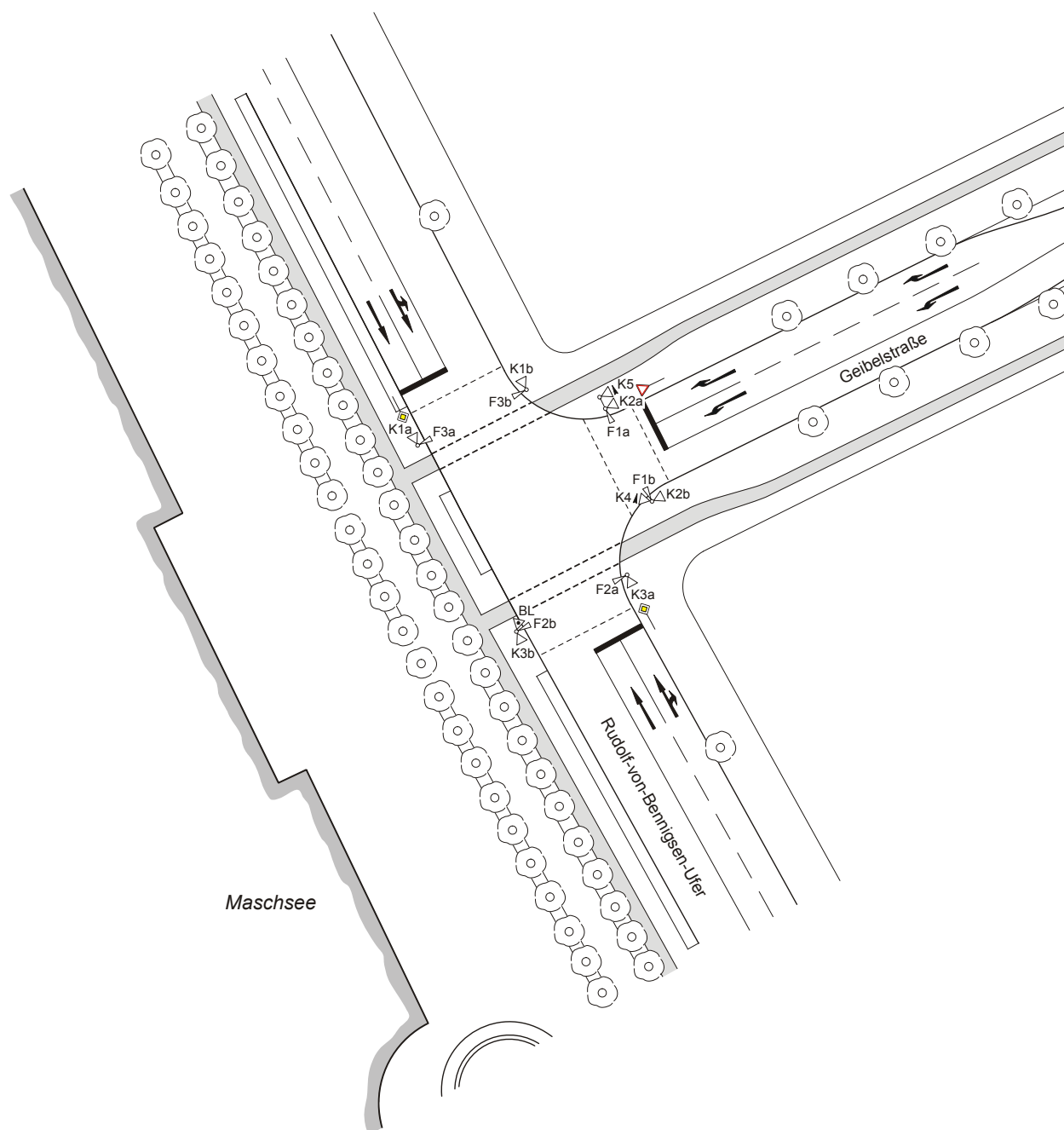


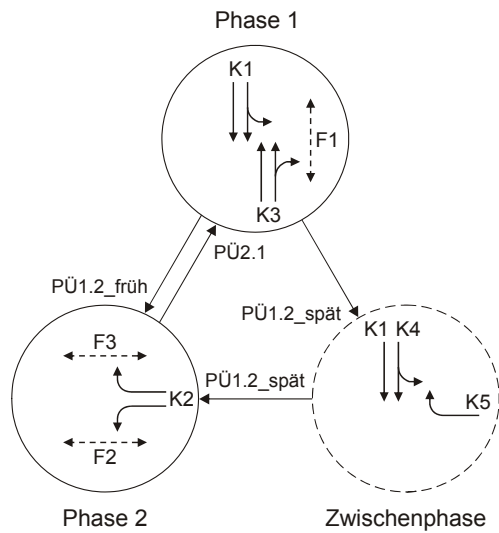
		beginnende Signalgruppen							
		K1	K2	K3	K4	K5	F1	F2	F3
endende Signalgruppen	K1		7					7	7
	K2	6		6			5		
	K3				6	4		7	7
	K4		6						
	K5		7						7
	F1		13		13	11			
	F2	10		10					
	F3	10		10					



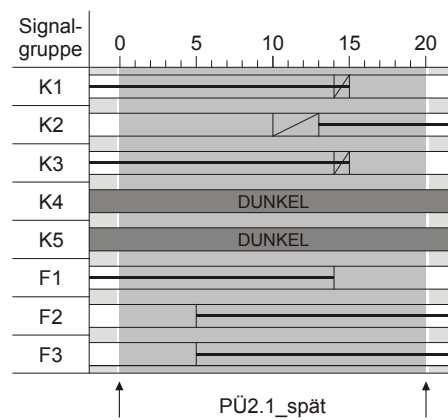
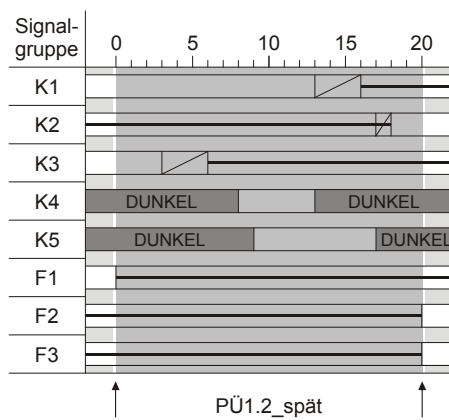
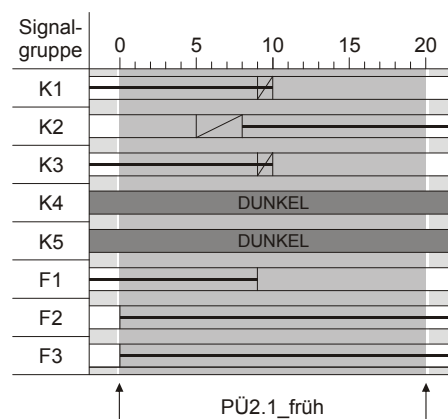
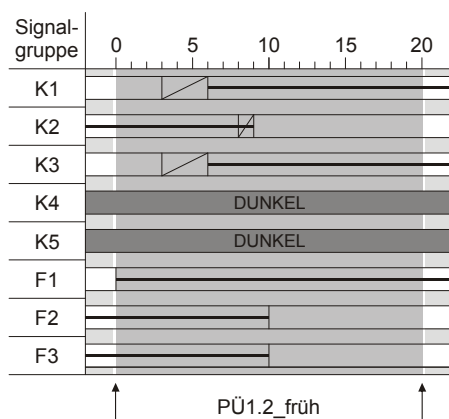


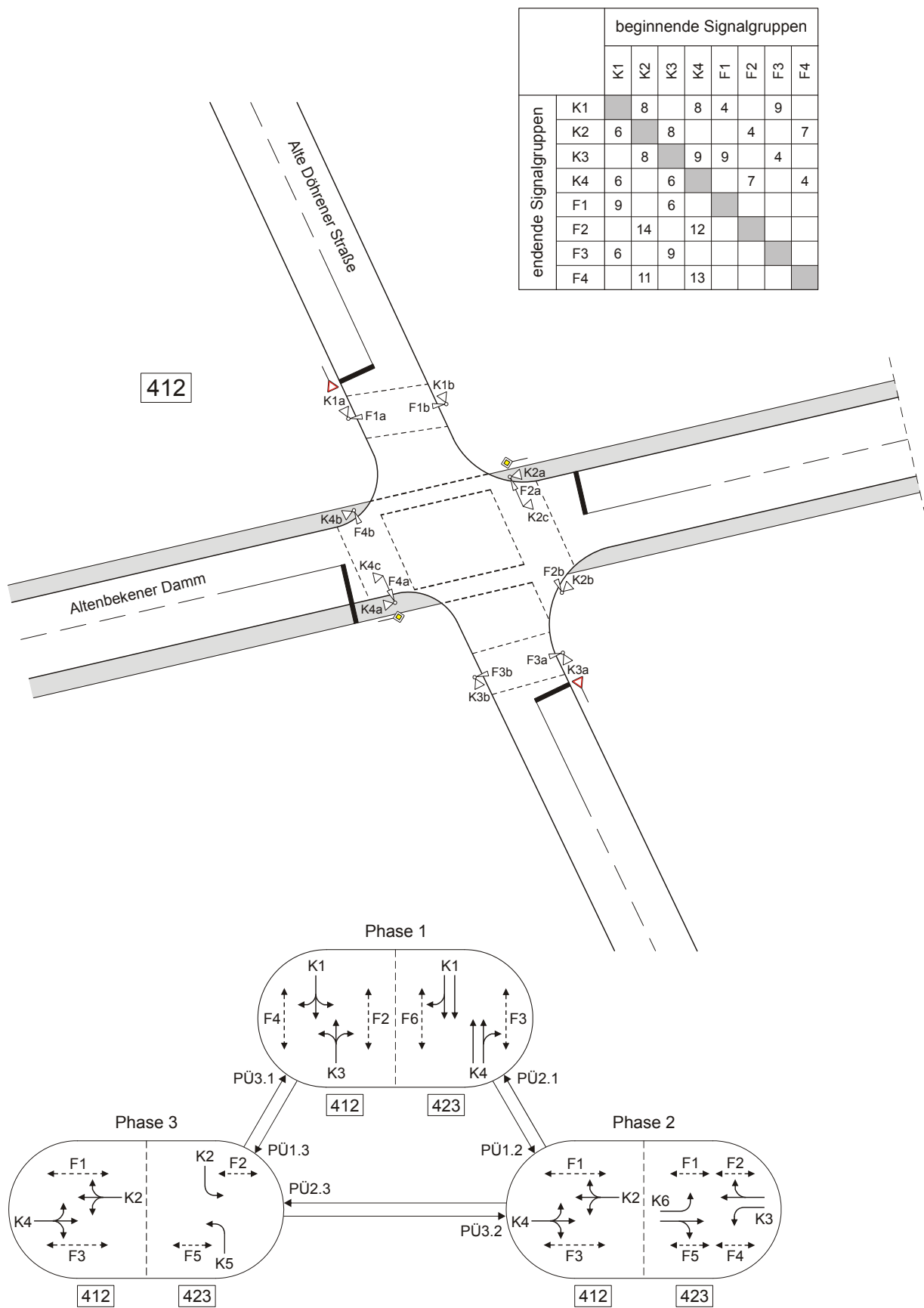
## A 6 Steuerungsverfahren CE für KP 402

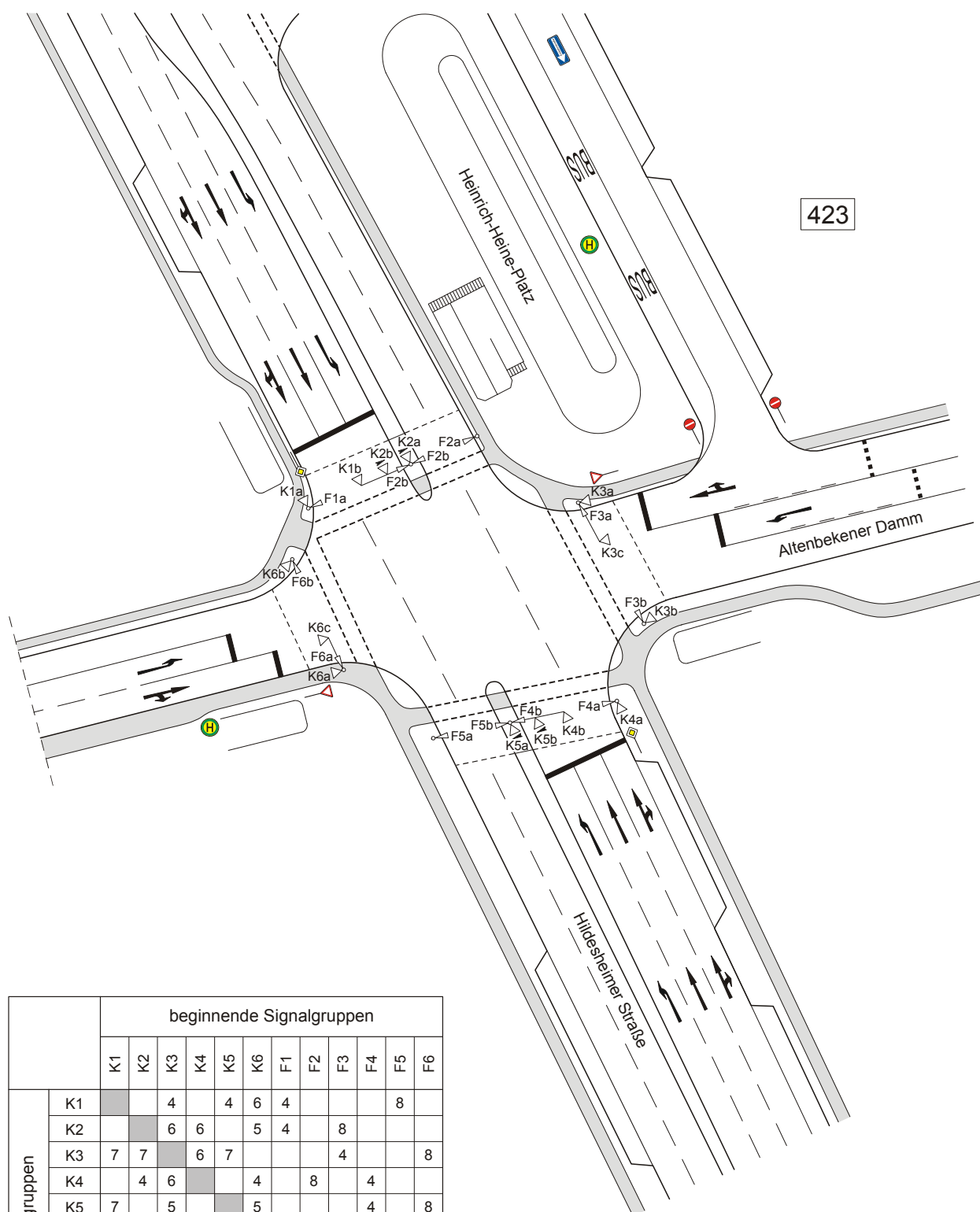




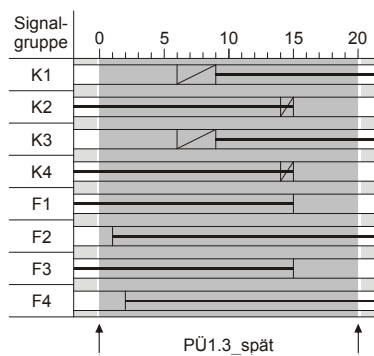
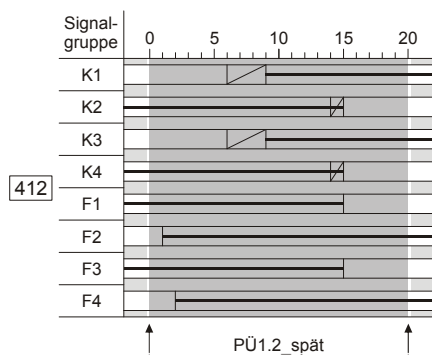
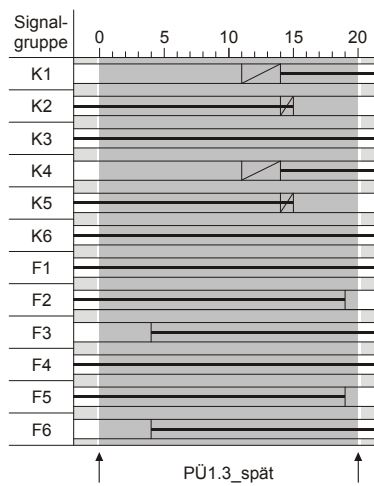
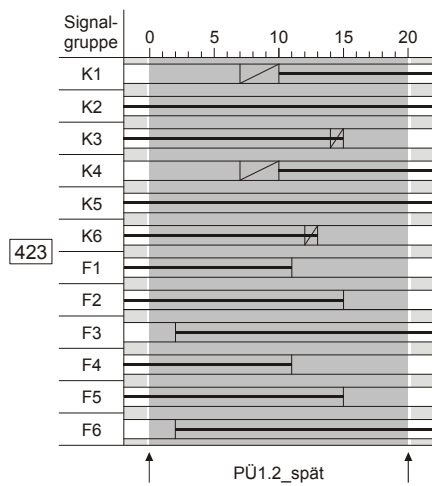
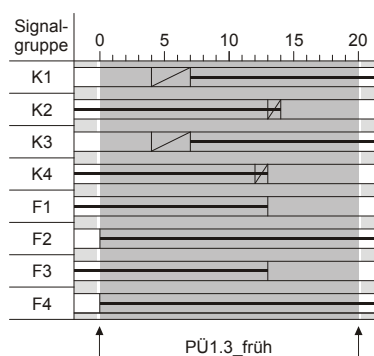
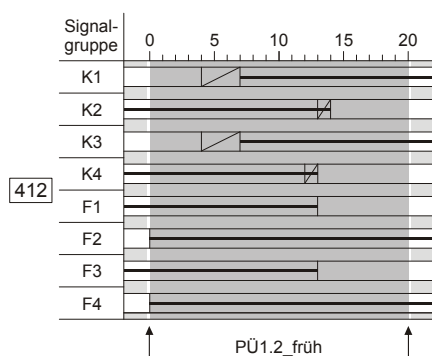
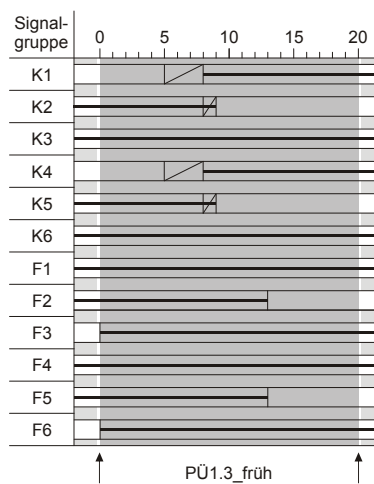
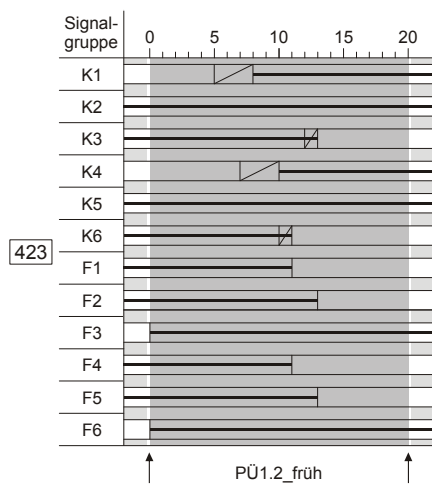
		beginnende Signalgruppen							
		K1	K2	K3	K4	K5	F1	F2	F3
endende Signalgruppen	K1		5					7	4
	K2	4		5	5		4		
	K3		6		5	6		5	7
	K4		5	5			7		4
	K5			4			4		
	F1		9		9	9			
	F2	7		10					
	F3	10		7	10	8			

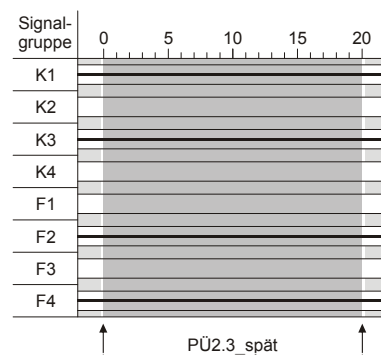
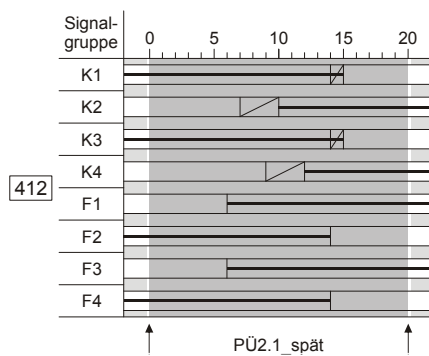
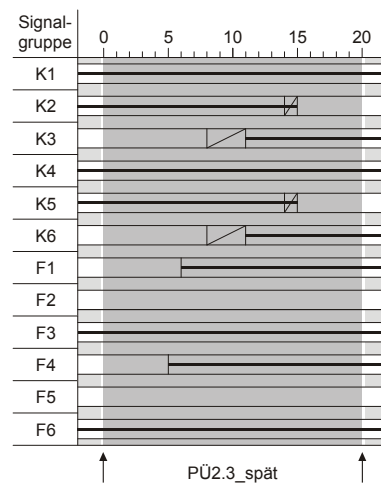
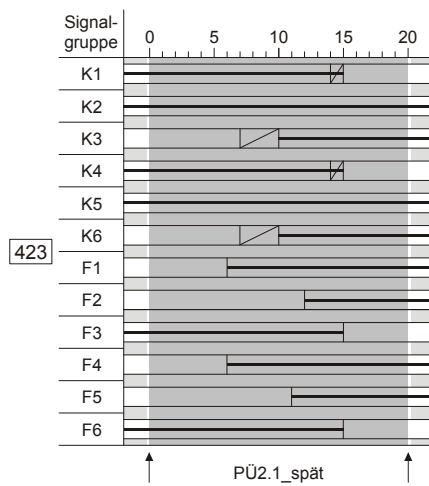
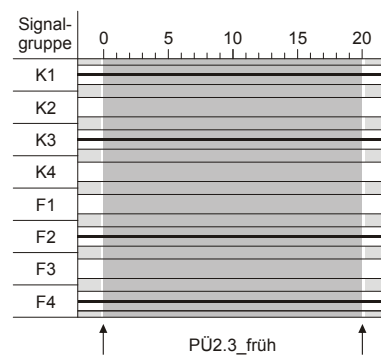
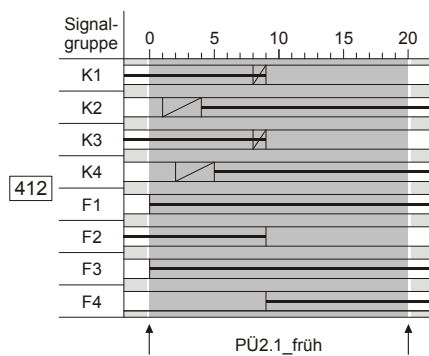
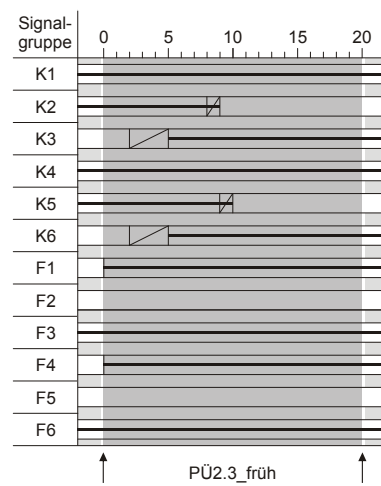
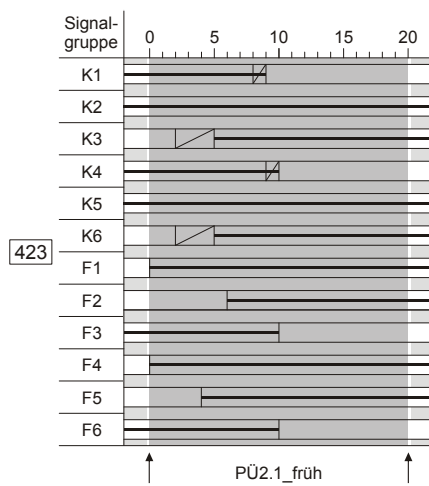


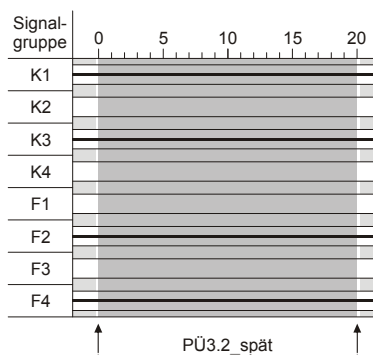
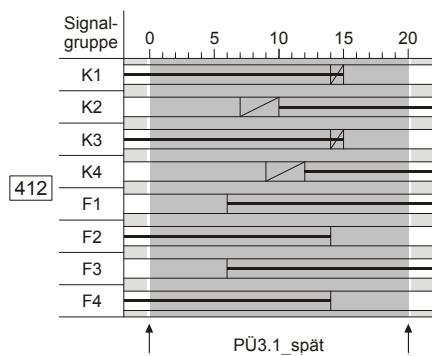
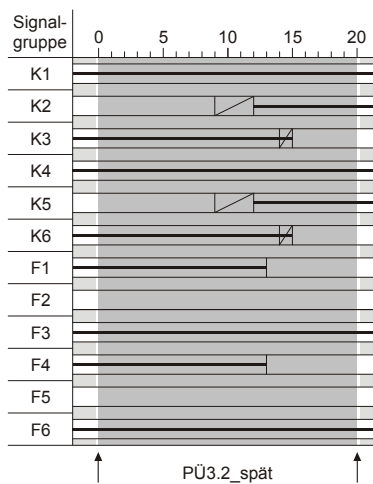
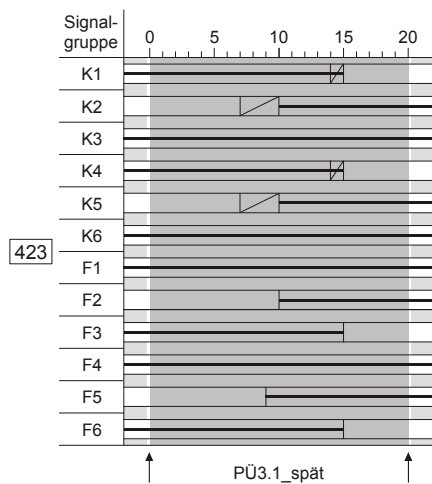
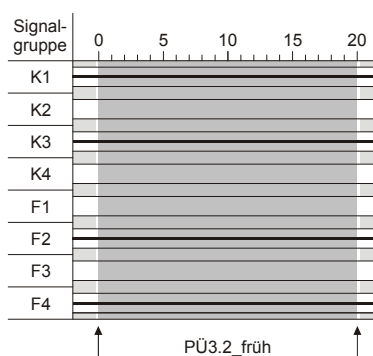
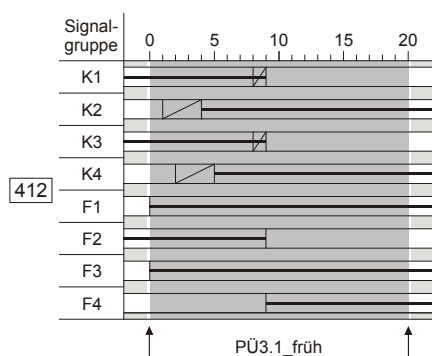
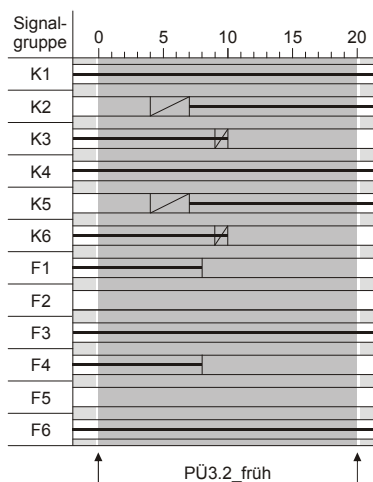
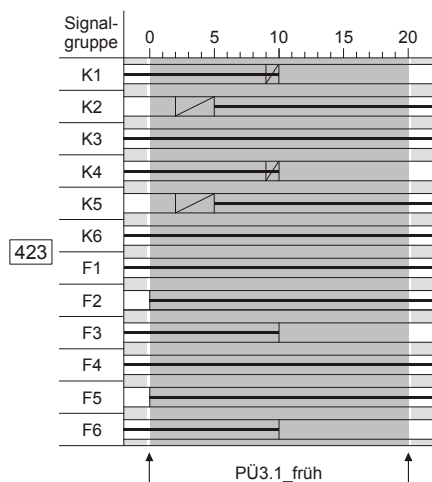
**A 7      Steuerungsverfahren CE für kombinierten KP 412 und 423**


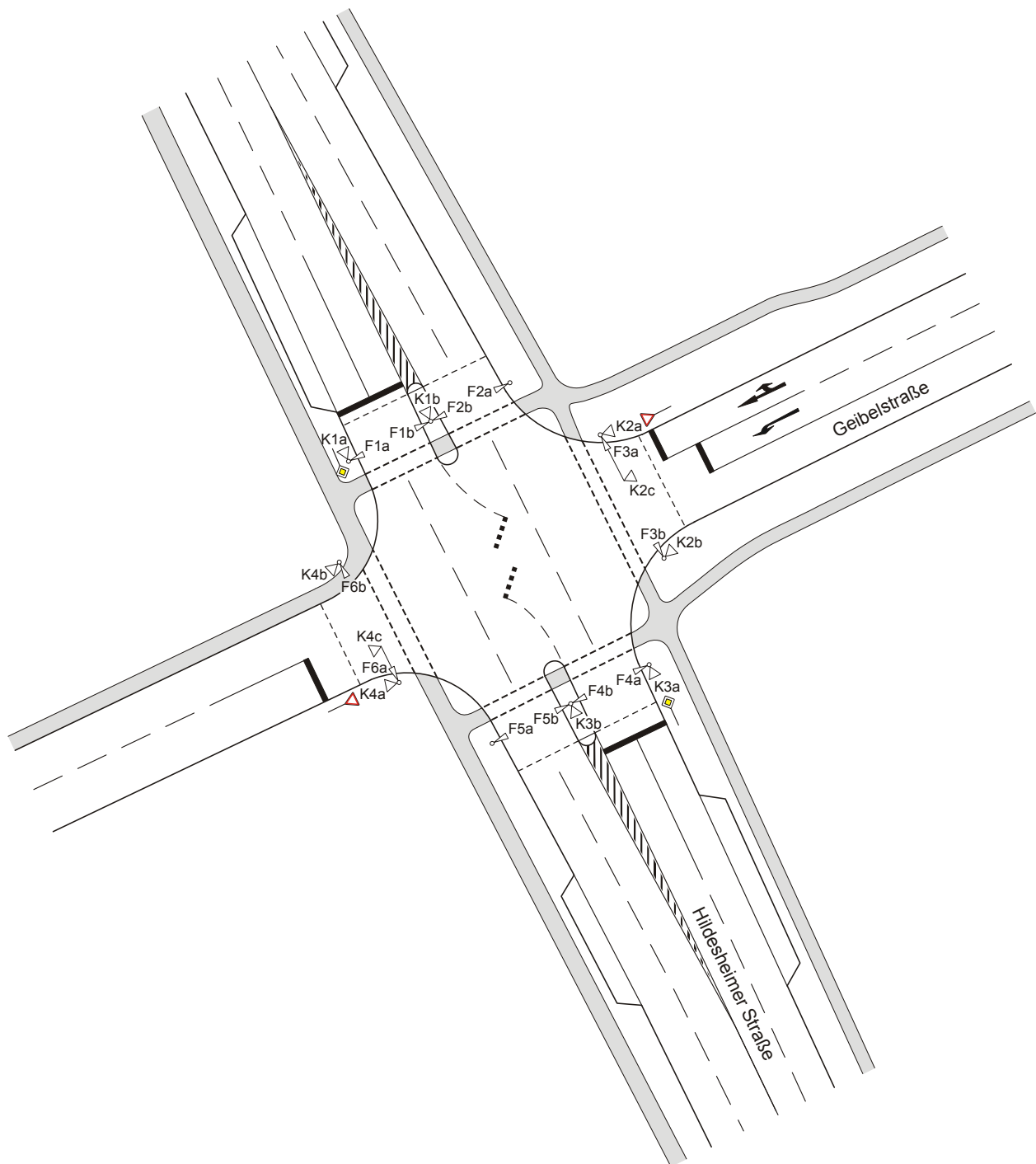


		beginnende Signalgruppen											
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
endende Signalgruppen	K1			4		4	6	4				8	
	K2			6	6		5	4		8			
	K3	7	7		6	7				4			8
	K4		4	6			4		8		4		
	K5	7		5			5				4		8
	K6	7	7		7	7				8			4
	F1	9	9										
	F2				4								
	F3		9	13			9						
	F4				10	10							
	F5	5											
	F6			9		9	11						

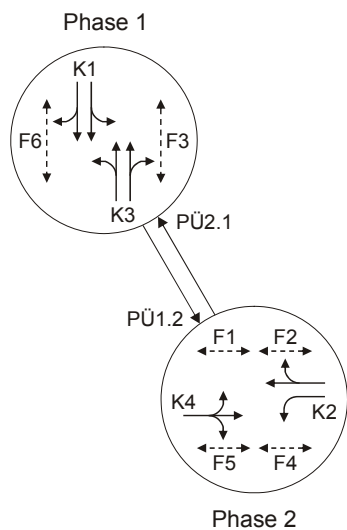




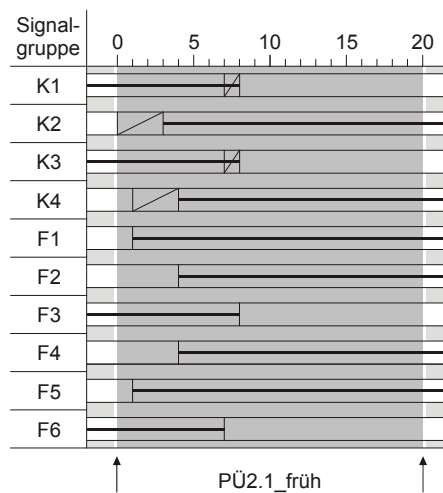
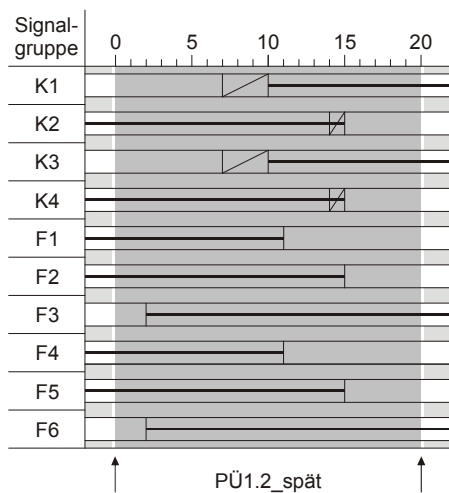
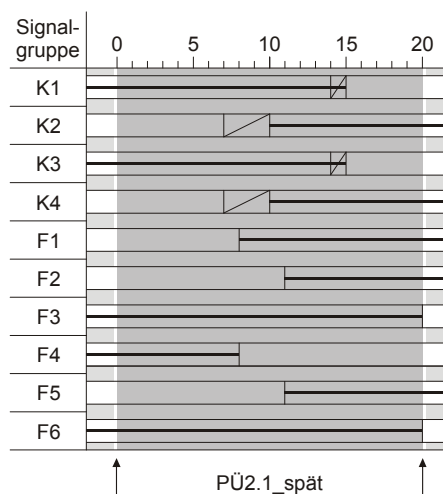
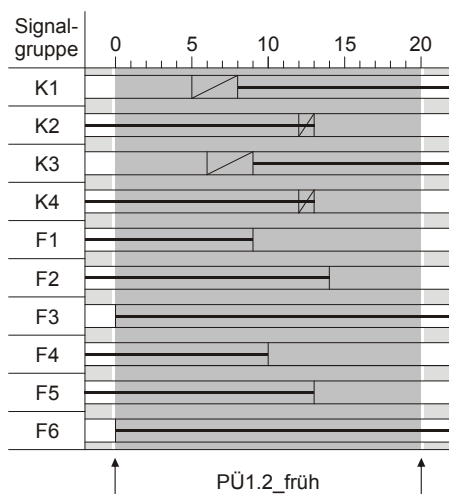




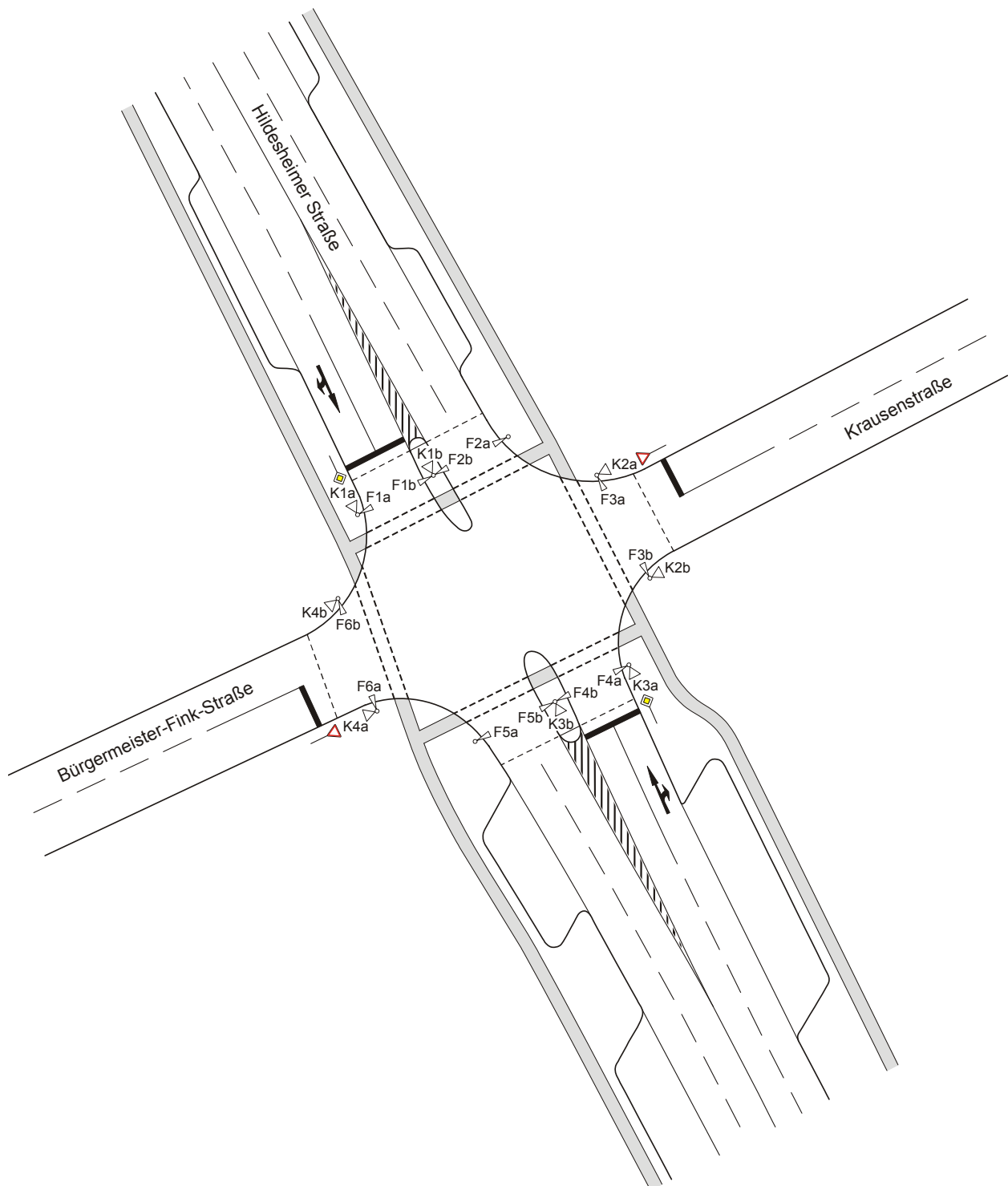


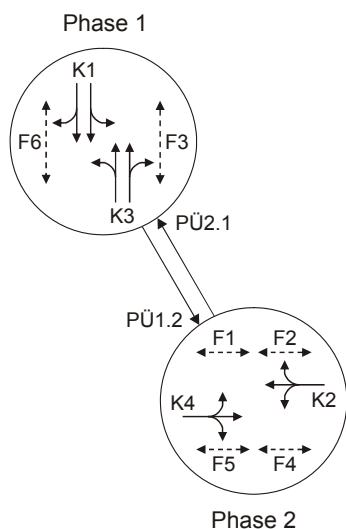


		beginnende Signalgruppen									
		K1	K2	K3	K4	F1	F2	F3	F4	F5	F6
endende Signalgruppen	K1		8		7	4				8	
	K2	7		8				4			7
	K3		7		7		8		4		
	K4	7		7				7			4
	F1	7									
	F2			4							
	F3		13		11						
	F4			7							
	F5	4									
	F6		11		13						

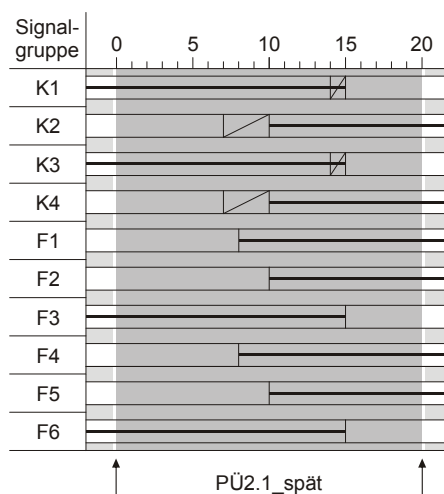
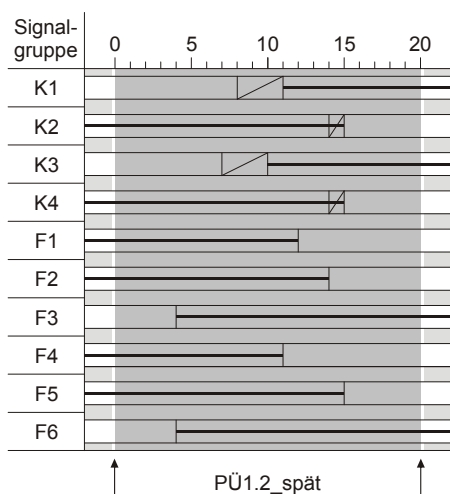
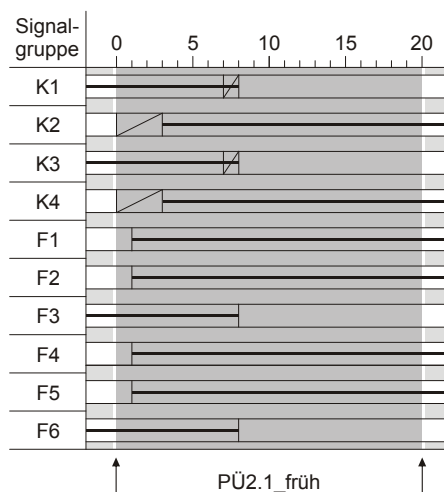
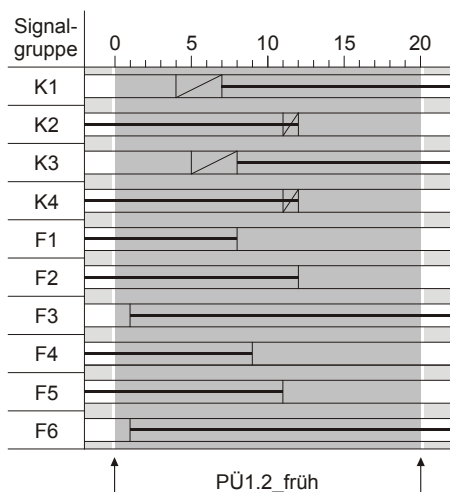


## A 9 Steuerungsverfahren CE für KP 421

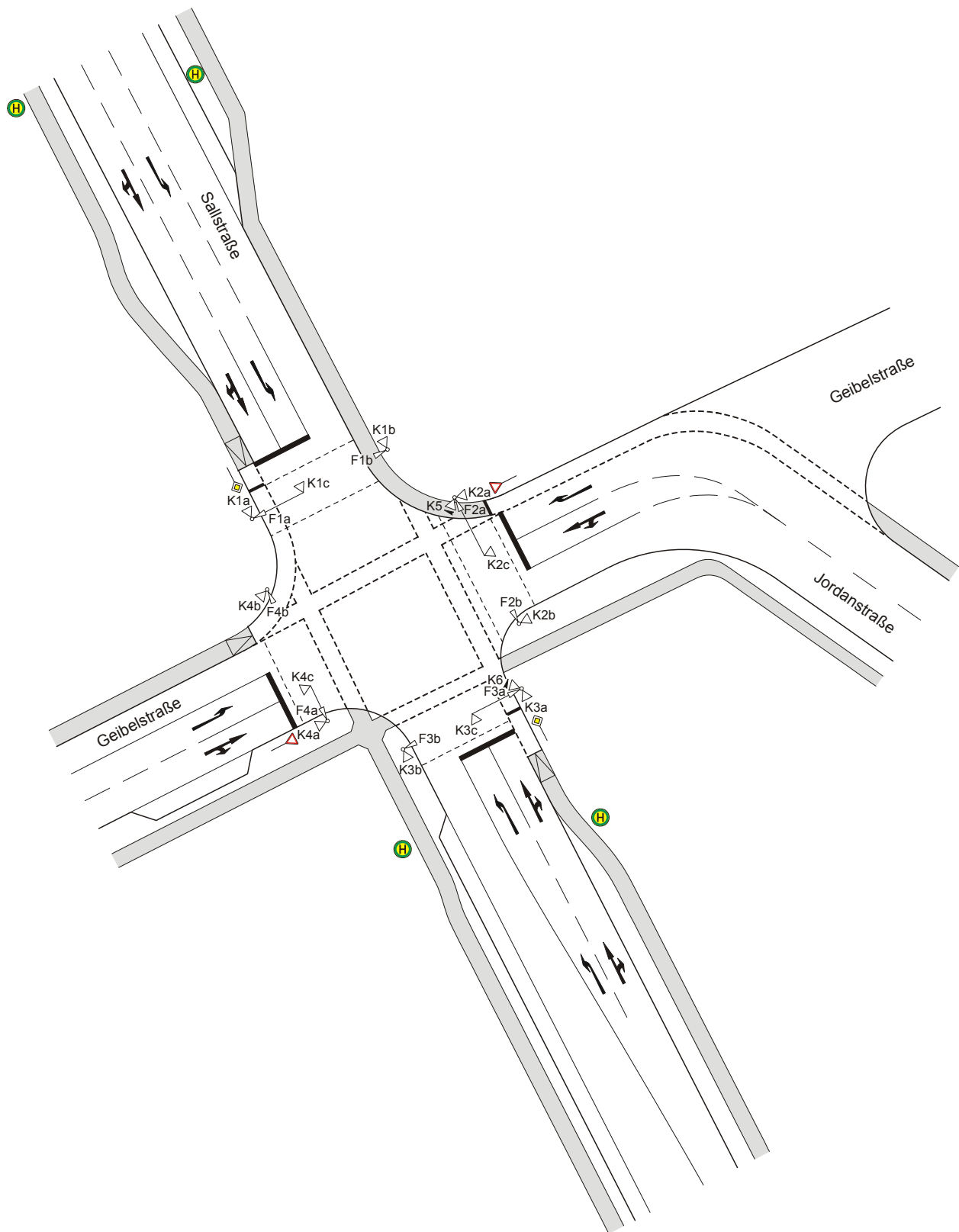


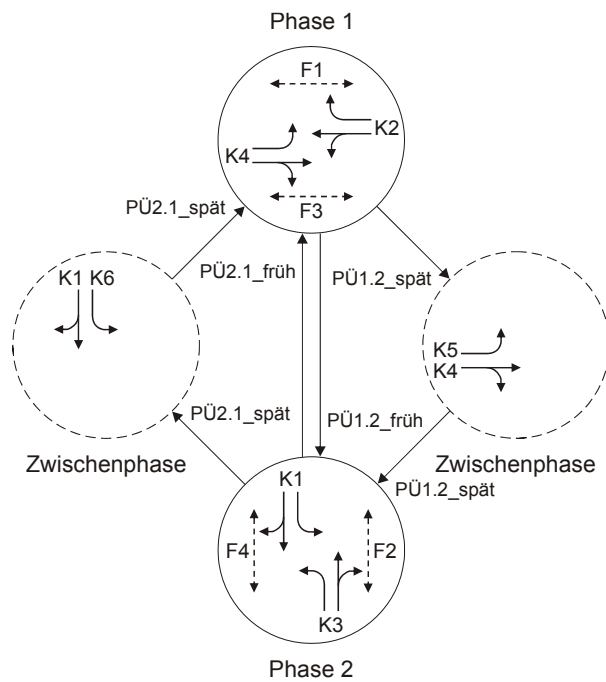


		beginnende Signalgruppen									
		K1	K2	K3	K4	F1	F2	F3	F4	F5	F6
endende Signalgruppen	K1		8		8	4				7	
	K2	7		8				4			8
	K3		7		7		7		4		
	K4	7		7				8			4
	F1	7									
	F2			5							
	F3		11		8						
	F4			7							
	F5	5									
	F6		8		11						

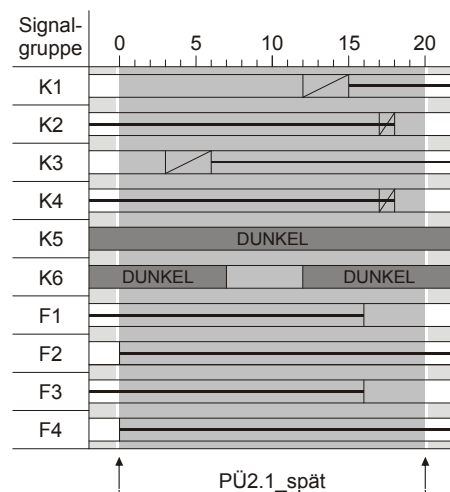
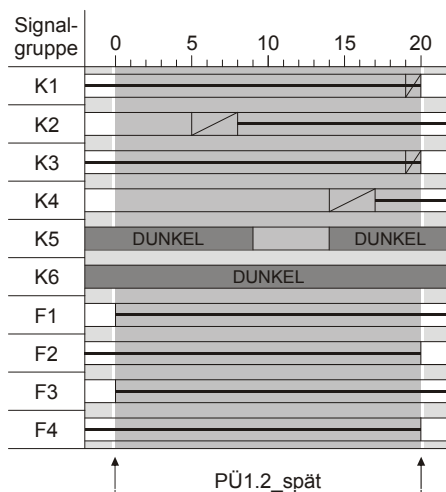
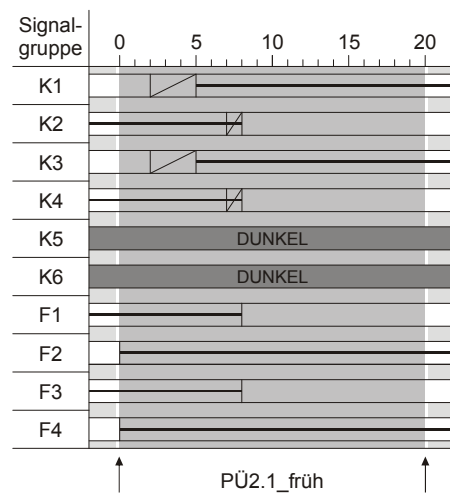
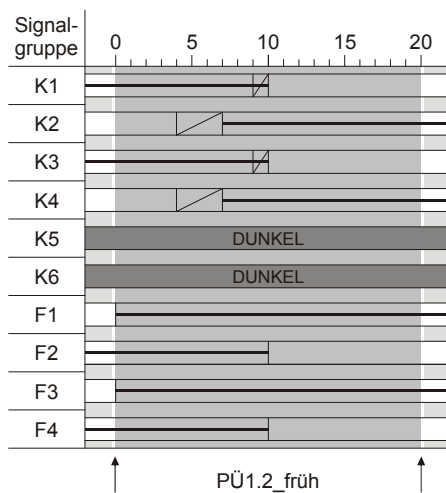


## A 10 Steuerungsverfahren CE für KP 450

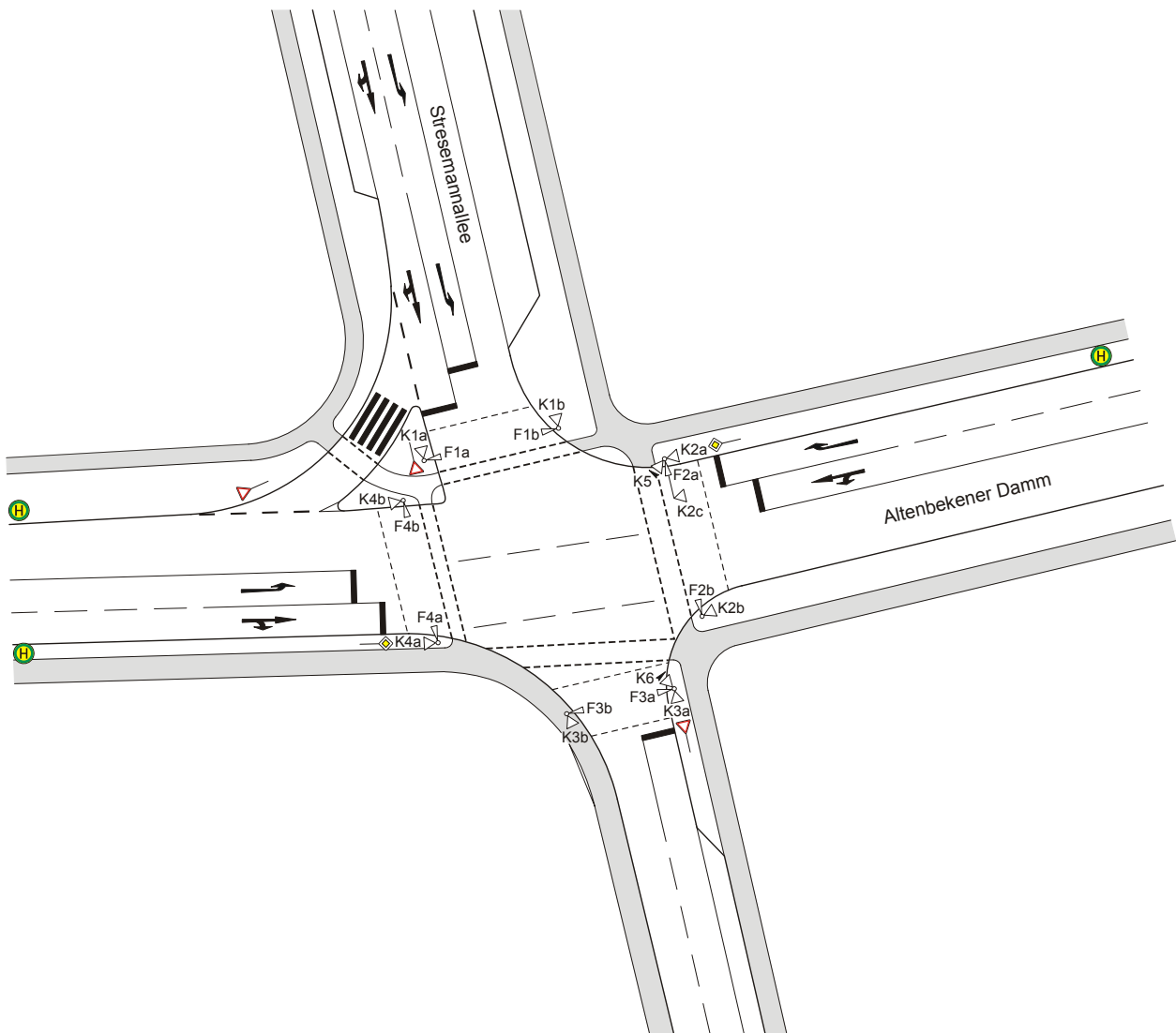


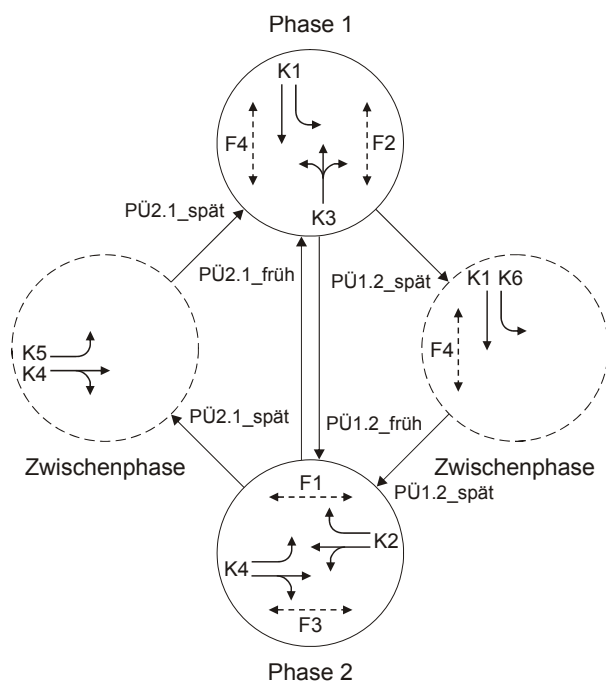


		beginnende Signalgruppen									
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	F1	F2	F3	F4
endende Signalgruppen	K1		5		6	6		4		6	
	K2	6		5		4	6		4		6
	K3		6		6	6	4	6		4	
	K4	5		6			5		6		4
	K5	5	3	6				4			
	K6		5	4	6				4		
	F1	10		10		9					
	F2		8		7		7				
	F3	9		10							
	F4		7		8						

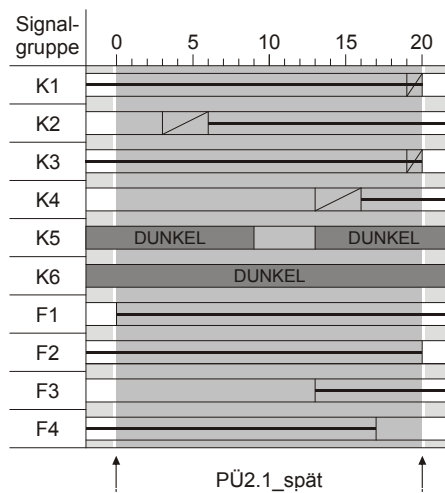
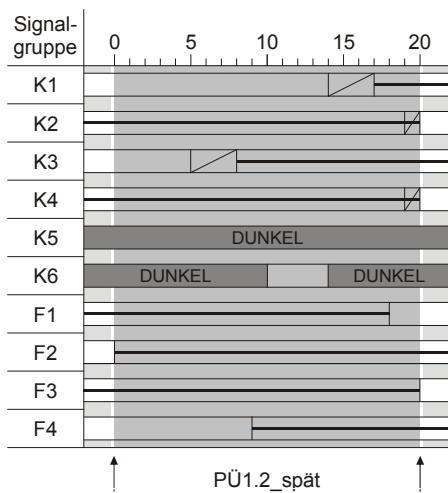
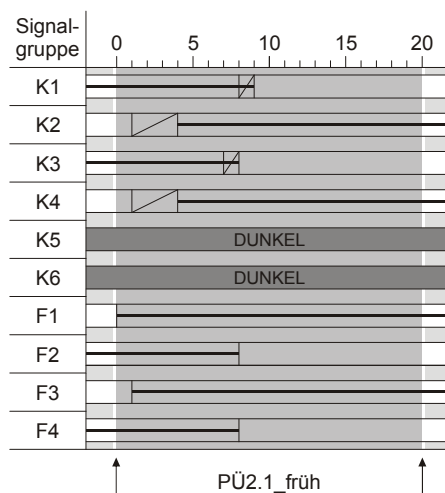
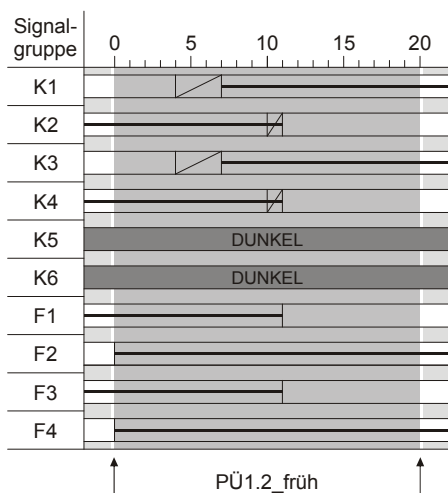


## A 11 Steuerungsverfahren CE für KP 451

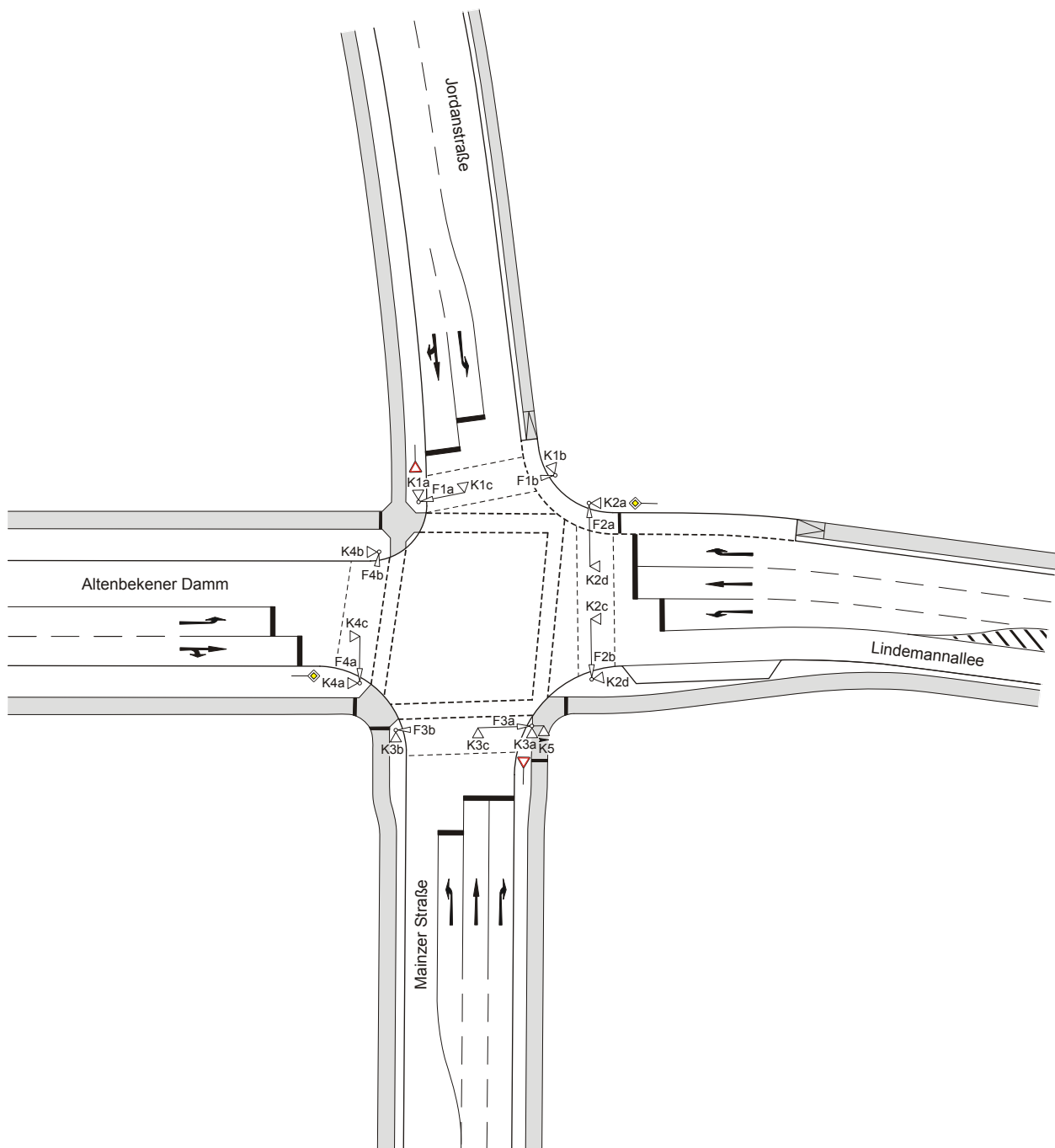




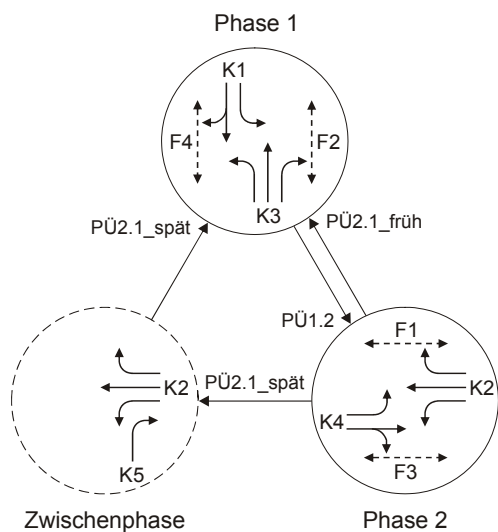
		beginnende Signalgruppen									
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	F1	F2	F3	F4
endende Signalgruppen	K1		6		6	6		4		6	
	K2	7		6		5	7		4		7
	K3		7		7	7	5	7		4	
	K4	6		7			6		7		4
	K5	6	6	7				4			
	K6		6	4	6				4		
	F1	9		8		8					
	F2		11		10		10				
	F3	7		7							
	F4		10		11						



## A 12 Steuerungsverfahren CE für KP 452







		beginnende Signalgruppen								
		K1	K2	K3	K4	K5	F1	F2	F3	F4
endende Signalgruppen	K1		6		7					
	K2	6		6						
	K3		8		6					
	K4	6		7		7				
	K5		8							
	F1									
	F2									
	F3									
	F4									

